



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE MATERIAIS



ENG 02298 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

Avaliação dos processos de endurecimento de pinos de terminais de direção

Gustavo da Rosa Cunha
193454

Professor Orientador: Prof. Dr. Hugo Veit
Coorientador: Eng. Matheus Antonio Heck Sumny

Dezembro de 2018

Gustavo da Rosa Cunha

AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE ENDURECIMENTO DE PINOS DE TERMINAIS DE DIREÇÃO

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel (a) em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Veit

Coorientador: Eng. Matheus Antonio Heck Sumny

Porto Alegre

2018

RESUMO

Terminais de direção são itens de segurança que ligam o sistema de direção às rodas de veículos automotores. São compostos por diferentes partes, como pino esférico, bucha e carcaça, confeccionadas a partir de materiais e processos específicos de acordo com as solicitações exigidas a cada uma. Atualmente, terminais de direção e terminais axiais aplicados no mercado brasileiro são regulamentados através da Portaria 247 de 2013 do INMETRO, que estabelece diversos critérios a serem seguidos para a validação do produto, entre eles que o método de endurecimento a ser empregado em pinos esféricos de terminais de direção deve ser o de têmpera e revenimento. Neste contexto, este trabalho desenvolveu análises comparativas em pinos de terminais de direção endurecidos tanto por encruamento quanto por têmpera e revenimento utilizando a norma ABNT NBR 16130 como base para comparação para critérios microestruturais e de resistência mecânica. Foram produzidos pinos de veículos das categorias M1 (veículo para transporte de passageiros que não tenham mais do que 8 assentos) e N1 (veículos para transporte de carga que contenham uma massa máxima não superior a 3,5 t) com aço DIN 41Cr4 endurecidos por ambos os métodos e foi realizado ensaio de dureza, impacto e análise metalográfica. Foram realizados ensaios de dureza, impacto e, após a realização dos ensaios de impacto, ensaio por partículas magnéticas para avaliar a integridade do material. Os resultados mostraram que ambos os processos de endurecimento são eficientes para se obter as propriedades de resistência à tração e ao impacto exigidas pela legislação brasileira atual para estes componentes, tendo os pinos endurecidos por têmpera e revenimento maior resistência mecânica e apresentado menor deformação após o impacto.

Palavras-chave: Terminal de direção, pino esférico, endurecimento por encruamento, seleção de materiais.

ABSTRACT

Tie rod ends are safety items that connect the steering system to the wheels of automotive vehicles. They are composed by different parts, as the ball joint studs, ball race and the outer ball joint housing, all made with different materials and processes according to each part required property. Currently, tie rods that are applied in Brazilian market are regulated through INMETRO's Portaria 247 from 2013, that establishes several criteria that must be followed for the product validation, among them the hardening process to be employed on ball joint studs of tie rod ends should be that of quenching and tempering. Under this context, this work developed comparative analysis on ball joint studs of tie rod ends hardened by both work hardening and quenching and tempering using the ABNT NBR 16130 standard as basis of comparison for microstructural and mechanical resistance criteria. Ball joint studs for Brazilian vehicle categories M1 (passenger transport vehicle with no more than 8 seats) and N1 (load vehicle not heavier than 3,5 t) were produced with DIN 41Cr4 steel hardened both by work hardening and quenching and tempering and hardness test, impact test and metallographic analysis were performed. Hardness and impact tests were carried out and, after the impact tests, magnetic particle test to evaluate the integrity of the material. The results showed that both hardening processes are efficient to obtain the tensile and impact properties required by current Brazilian legislation for these components, with the hardened hardened and tempered pins having higher mechanical strength and lower deformation after impact.

Keywords: Tie rod end, ball joint stud, work hardening, material selection.

Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema de direção hidráulico do tipo pinhão e cremalheira.	13
Figura 2 - Representação esquemática do sistema de direção do tipo pinhão e cremalheira.	14
Figura 3 - Representação esquemática de um terminal de direção, com carcaça (verde), tampa seladora (marrom), bucha (rosa), coifa (roxo) e pino esférico (cinza).	14
Figura 4 - Representação esquemática de processo de conformação a frio de pinos esféricas em quatro etapas: (a) forma inicial, (b) processo de arredondamento, (c) extrusão reversa, (d) conformação da pré-forma e (e) conformação da esfera. (9)	15
Figura 5 - Variações de desenho de pinos de terminais de direção	15
Figura 6 - Diagrama de transformação em resfriamento contínuo para o aço DIN 41Cr4.	18
Figura 7 - Alongamento total antes da ruptura em relação à temperatura de revenimento do aço DIN 41Cr4. Modificado (12)	18
Figura 8 - Diagrama de transformação em resfriamento contínuo para o aço DIN 42CrMo4 (18).	19
Figura 9 - Alongamento total antes da ruptura em relação à temperatura de revenimento do aço DIN 42CrMo4. Modificado (12)	20
Figura 10 - Dureza em relação à temperatura de revenimento dos aços DIN 41Cr4 e DIN 42CrMo4. Modificado (12)	21
Figura 11 - Comparação de vida em fadiga dos aços DIN41Cr4 e DIN42CrMo4 (12)	21
Figura 12 - Relação entre dureza e resistência a tração para aços temperados e revenidos, como laminado, ou laminado para aços ao carbono ou ligados.	23
Figura 13 - Representação esquemática do ensaio de dureza por impacto.	24
Figura 14 - Representação esquemático dos corpos de prova dos ensaios de Charpy (esquerda) e impacto IZOD (direita).	24
Figura 15 - Relação entre resistência à tração, limite de escoamento e a ductilidade em função da temperatura de revenimento de um aço de baixa liga (tipo SAE 4340). Retirado de Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução (16)	26
Figura 16 - Alteração na estrutura de grãos de um material policristalino após deformação plástica. (a) Grãos equiaxiais antes da deformação e (b) Grãos alongados devido à deformação (16). 27	27
Figura 17 – Linhas de escorregamento em uma amostra de um material metálico policristalino após o mesmo ter sido deformado. É possível observar que diferentes grãos apresentam diferentes direções de escorregamento e que as mesmas não ultrapassam os contornos de grão (16).	28
Figura 18 - Luz incidindo em três grãos com orientação cristalográfica diferente atacados quimicamente (21).	29
Figura 19 - Representação figurativa de três grãos com orientação cristalográfica diferente após serem atacados quimicamente (21)	29
Figura 20 - Microestrutura de aço DIN 41Cr4 como-laminado, formada por ferrita e perlita. Ataque realizado com Nital 2%. Imagens obtidas através de microscopia eletrônica de varredura com aumento original de 4000X (16).	30

Figura 21 - Fluxograma representativo da parte experimental desenvolvida no trabalho.....	31
Figura 22- Corpo de prova preparado para ensaio de dureza	33
Figura 23- Pino engastado em dispositivo projetado para o ensaio de impacto.	34
Figura 24 - Corpo de prova da amostra CP3E em equipamento de ensaio por partículas magnéticas.....	34
Figura 25 - Análise metalográfica em seção transversal de amostra da matéria-prima utilizada para confeccionar as amostras CP1E e CP1T. Aumento original de 100X.	35
Figura 26 - Análise metalográfica em seção transversal de amostra da matéria-prima utilizada para confeccionar as amostras CP1E e CP1T. Aumento original de 1000X.	36
Figura 27 - Análise metalográfica realizada próxima ao centro da esfera de um dos corpos de prova da amostra CP1E, com grãos deformados devido ao trabalho a frio. Aumento original de 100x.	36
Figura 28 - Análise metalográfica realizada próxima ao centro da esfera de um dos corpos de prova da amostra CP1E, com grãos deformados devido ao trabalho a frio. Aumento original de 500x.	37
Figura 29- Análise metalográfica realizada próxima ao centro do cone de um dos corpos de prova da amostra CP1E, com grãos pouco deformados devido ao trabalho a frio. Aumento original de 500x.....	37
Figura 30 - Análise metalográfica realizada próxima ao centro da esfera de um dos corpos de prova da amostra CP2T. Aumento original de 1000X.	38
Figura 31 - Impressões geradas durante o ensaio de dureza de um dos corpos de prova da amostra CP1E na região da esfera (esquerda) e cone (direita) do corpo de prova.....	39
Figura 32 - Impressões geradas durante o ensaio de dureza de um dos corpos de prova da amostra CP3T na região da esfera (esquerda) e cone (direita) do corpo de prova.....	40
Figura 33 - Corpos de prova das amostras CP1E (esquerda) e CP4T(direita), de maior e menor deformação após o ensaio de impacto, respectivamente.....	41
Figura 34 - Resultado do ensaio por partículas magnéticas em corpo de prova da amostra CP3E após o ensaio de impacto, sem apresentar descontinuidades superficiais.....	42

Lista de tabelas

Tabela 1 - Classificação de pinos em famílias de acordo com a norma ABNT NBR 16130 (10)	16
Tabela 2 - Composição nominal dos aços DIN 41Cr4 e DIN 42CrMo4, em porcentagem de massa (12)	17
Tabela 3 - Valores esperados de dureza para os aços 41Cr4 e 41CrMo4 em HV (14)	18
Tabela 4 - Relação das amostras confeccionadas	32
Tabela 5 - Resultado dos Ensaio de Dureza	39
Tabela 6 - Ângulo médio de deflexão gerado pelo impacto	40

Siglas e Definições

Arrancamento – Extração do pino esférico do alojamento do terminal axial ou de direção.

Barras de direção – Elementos do sistema de direção destinados a transmitir esforços e movimentos entre o mecanismo de direção e as rodas direcionais do veículo.

Bucha – Componente polimérico localizado entre o pino esférico e o alojamento do terminal axial ou de direção.

Categoria M - Veículos rodoviários que contém, pelo menos, quatro rodas, projetados e construídos para o transporte de passageiros.

Categoria M1 – Veículos projetados e construídos para o transporte de passageiros, que não tenham mais do que oito assentos, além do assento do condutor.

Categoria M2 – Veículos projetados e construídos para o transporte de passageiros, que tenham mais do que oito assentos, além do assento do condutor, e que contenham uma massa máxima não superior a 5 t.

Categoria N – Veículos automotores que contém, pelo menos, quatro rodas, projetados e construídos para o transporte de cargas.

Categoria N1 - Veículos projetados e construídos para o transporte de cargas e que contenham uma massa máxima não superior a 3,5 t.

Conformação a frio – Processo mecânico onde se obtém peças através da compressão abaixo da temperatura de recristalização de metais sólidos em moldes, utilizando a deformação plástica da matéria-prima para o preenchimento das cavidades dos moldes.

COPANT – Comissão Panamericana de Normas Técnicas

Diâmetro nominal da esfera – Diâmetro aproximado da região esférica do pino.

DIN – *Deutsches Institut für Normung*

Discordâncias – Defeitos cristalinos unidimensionais, como um semiplano extra de átomos.

Encruamento – Endurecimento do metal por deformação plástica.

Fosfatização – Processo em metalurgia de proteção superficial de metais que consiste na conversão do metal em um fosfato (sal) insolúvel do íon metálico.

Laminação – Processo de conformação mecânica que consiste em modificar a seção transversal de um metal pela sua passagem entre dois cilindros paralelos girando em sentidos opostos.

Laminação a quente - Processo de laminação de metais e ligas que acontece acima da temperatura de recristalização do material.

Material ferromagnético – Materiais que apresentam momento magnético mesmo na ausência de um campo magnético externo e apresentam forte magnetização permanente.

PEEK – Polieterecetona

POM – Polioxidometileno

Recozimento subcrítico – Aquecimento por tempo prolongado a uma temperatura logo abaixo da linha inferior de zona crítica.

Revenimento - Tratamento térmico efetuado ao aço, para corrigir inconvenientes decorrentes da têmpera.

SAE – *Society of Automotive Engineers*

Terminal de direção e terminal axial – Articulações da direção. Elementos da direção que vinculam braços e barras permitindo a transmissão de esforço e movimento entre estes.

Torque de rotação – Torque necessário para rotacionar o pino esférico em torno de seu próprio eixo quando o mesmo está inserido na carcaça do terminal de direção.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVO GERAL	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	SISTEMAS DE DIREÇÃO AUTOMOTIVOS	13
3.1.1	<i>Terminais de direção</i>	13
3.1.2	<i>Pinos esféricos de terminais de direção</i>	15
3.1.3	<i>Regulamentações e legislações</i>	16
3.2	MATÉRIAS-PRIMAS E UTILIZADAS EM PINOS DE TERMINAIS DE DIREÇÃO	17
3.2.1	<i>Aço DIN 41Cr4 (COPANT 5140)</i>	17
3.2.2	<i>Aço DIN 42CrMo4 (COPANT 4140)</i>	18
3.2.3	<i>Aço DIN 41Cr4 vs. Aço 42CrMo4</i>	20
3.3	ENSAIOS MECÂNICOS	21
3.3.1	<i>Dureza</i>	21
3.3.2	<i>Ensaio de impacto</i>	23
3.4	PROCESSOS DE ENDURECIMENTO	24
3.4.1	<i>Endurecimento por têmpera e revenimento</i>	25
3.4.2	<i>Endurecimento por encruamento</i>	26
3.5	ANÁLISE METALOGRÁFICA	28
3.6	INSPEÇÃO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	30
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
4.1	MATERIAL	31
4.2	MÉTODOS	32
4.2.1	<i>Ensaio de dureza</i>	32
4.2.2	<i>Análise da microestrutura</i>	33
4.2.3	<i>Ensaio de impacto</i>	33
4.2.1	<i>Ensaio não destrutivo de partículas magnéticas</i>	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA	35
5.2	ENSAIO DE DUREZA	38
5.3	ENSAIO DE IMPACTO	40
5.4	ENSAIO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	41
6	CONCLUSÃO	43

7	TRABALHOS FUTUROS	44
8	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

Terminais de direção e terminais axiais são itens de segurança de veículos automotores regulamentados no Brasil pela Portaria 247 de 2013 do INMETRO, que tem como base a norma ABNT NBR 16130, que estabelece diversos critérios para a validação dos produtos. Ambos são compostos por diferentes partes, como pino esférico, bucha e carcaça. Cada parte é confeccionada a partir de materiais e processos específicos de acordo com as solicitações exigidas.

A Portaria 247 de 2013 determina que o método de endurecimento a ser empregado em pinos esféricos de terminais de direção deve ser o de têmpera e revenimento, diferentemente dos pinos esféricos de terminais axiais que não tem essa exigência. Além disso, ela determina valores mínimos e máximos de dureza, restrições no material a ser empregado e resistência ao impacto em ensaios específicos para estes componentes.

Os terminais de direção ligam o sistema de direção às rodas de veículos automotores, transformando o movimento translacional das barras de direção em movimento rotacional para as rodas. Na maioria dos carros atuais, são conectados às rodas através do montante e ao sistema de direção através de terminais axiais, responsáveis pelo movimento angular vertical exigido pelas rodas.

Pinos esféricos de terminais de direção são responsáveis por ligar o terminal de direção ao montante e devem suportar as solicitações impostas pelo movimento das rodas dianteiras do veículo. Como as rodas possuem movimento rotacional e vertical, pinos de terminais de direção devem ser esféricos para que o terminal de direção tenha os graus de liberdade necessários para acompanhá-las. Os pinos esféricos geralmente são fabricados a partir de aços ligados, como DIN 41Cr4 ou DIN 42CrMo4, temperados e revenidos para que se obtenha os valores de dureza exigidos para estes componentes. Porém, de acordo com Urlau *et al.*, já são fabricados pinos esféricos com aço microligado, como o aço DIN 35V1, endurecidos por encruamento e com valores de dureza acima daqueles requisitados (1). Entretanto, ainda não há estudos que tenham obtidos estes resultados com o uso de aços ligados.

Dentro dos processos típicos de confecção de pinos esféricos está o de conformação à frio, no qual ocorre o endurecimento por encruamento em materiais metálicos policristalinos. De acordo com Urlau *et al.*, este processo pode garantir que estes critérios sejam atendidos sem a necessidade de tratamento térmico posterior à conformação, não comprometendo a integridade do item acabado (1). Para cumprir os requisitos da Portaria, após essa etapa, realiza-se os processos de têmpera e revenimento. Do ponto de vista da produção, encurtar a cadeia de processos necessários para a fabricação de um item reduz custos, diminui a necessidade de estoque e agiliza a entrega de produto ao cliente.

A limitação imposta em relação à microestrutura e ao processo de endurecimento pode acabar barrando avanços tecnológicos em relação à seleção do material a ser utilizado como matéria-prima para pinos esféricos de terminais de direção. Alguns aços microligados, por exemplo, atingem suas propriedades ótimas para esta aplicação quando endurecidos por encruamento. Os requisitos estabelecidos pela portaria, porém, acabam exigindo processos que podem ser desnecessários para que se garanta as propriedades mecânicas do produto final.

Assim, o estudo de processos de endurecimento destes componentes é necessário para o desenvolvimento de inovação na área de seleção de materiais para a indústria automotiva brasileira. Para isto, a comparação das propriedades mecânicas entre pinos esféricos produzidos com e sem tratamento térmico de acordo com os critérios estabelecidos por normas nacionais se torna pertinente.

2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão divididos entre geral e específicos.

2.1 Objetivo geral

Avaliar comparativamente os processos de endurecimento por têmpera e revenimento e por encruamento em pinos de terminais de direção fabricados em aço DIN 41Cr4 de veículos automotivos das categorias M1 e N1 fabricados em aço DIN 41Cr4 utilizando a norma ABNT NBR 16130 como base de comparação.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a microestrutura de pinos esféricos de terminais de direção endurecidos por encruamento e por têmpera e revenimento;
- Avaliar a dureza de pinos esféricos de terminais de direção endurecidos por encruamento e por têmpera e revenimento;
- Avaliar a resistência ao impacto de pinos esféricos de terminais de direção endurecidos por encruamento e por têmpera e revenimento de acordo com os critérios estabelecidos na norma ABNT NBR 16130.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistemas de direção automotivos

Sistemas de direção servem para transmitir com precisão os movimentos dados pelo motorista às rodas do veículo. O sistema deve ser sensível e intuitivo o suficiente para que o condutor perceba qualquer alteração na direção ou nas rodas através de variações de torque no volante (2).

Os tipos de sistema de direção mais comum para automóveis com quatro ou mais rodas são os de pinhão e cremalheira, geralmente utilizados em veículos de transporte de passageiros, e de esfera de recirculação para veículos comerciais e algumas SUVs. Porém, com o aumento de peso de carros mais modernos e a entrada de sistemas de direção hidráulicos, os sistemas de pinhão e cremalheira se tornaram mais populares por apresentar maior custo-benefício (3).

Sistemas de direção de pinhão e cremalheira hidráulicos, ilustrados na Figura 1, funcionam através de uma caixa de direção com um sistema mecânico que transfere o torque aplicado pelo condutor no volante e movimenta uma barra de direção de maneira translacional. Esta barra de direção é conectada às rodas através de terminais de direção que permitem o movimento rotacional das rodas (2).

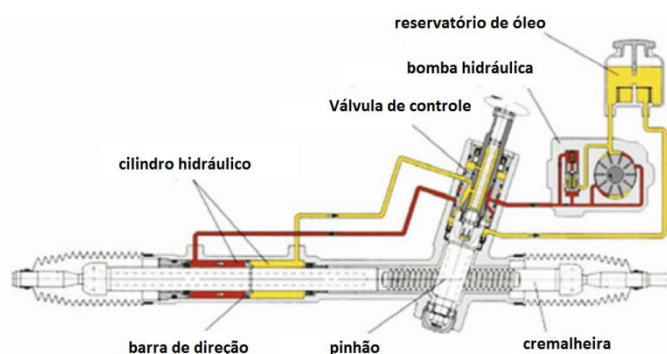


Figura 1 - Sistema de direção hidráulico do tipo pinhão e cremalheira.
Fonte: Chassis Handbook. Modificado (2)

3.1.1 Terminais de direção

O terminal de direção tem a função de transmitir os comandos dados pelo motorista às rodas do carro. Mecanicamente falando, ele tem a função de transformar o movimento translacional da barra de direção em movimento rotacional para as rodas. Além disto, o conjunto deve suportar movimentos verticais causados pelas rodas do carro em contato com a estrada. Portanto, terminais de direção devem possuir pinos esféricos que permitam movimentos angulares e que sejam colocados de maneira que o maior movimento de rotação se encontre no eixo destes pinos (2).

Terminais de direção se conectam ao sistema de direção através de terminais axiais que, por sua vez, se conectam à caixa de direção (4) (**Figura 2**). São compostos, basicamente, por um pino esférico perpendicular ao eixo do terminal axial, uma carcaça conformada a quente ou a frio onde o pino esférico é alojado e uma coifa elastomérica que impeça a entrada de contaminantes (2). Em geral, a causa mais frequente de falha em terminais de direção é a contaminação de água e sujeira entre o pino esférico e seu alojamento na carcaça, causando corrosão e desgaste prematuro das peças. O terminal ainda pode conter uma bucha polimérica para reduzir atrito entre o pino esférico e o

alojamento e reduzir o seu desgaste, geralmente produzida com POM ou PEEK, e uma tampa de fechamento (3) (**Figura 3**).

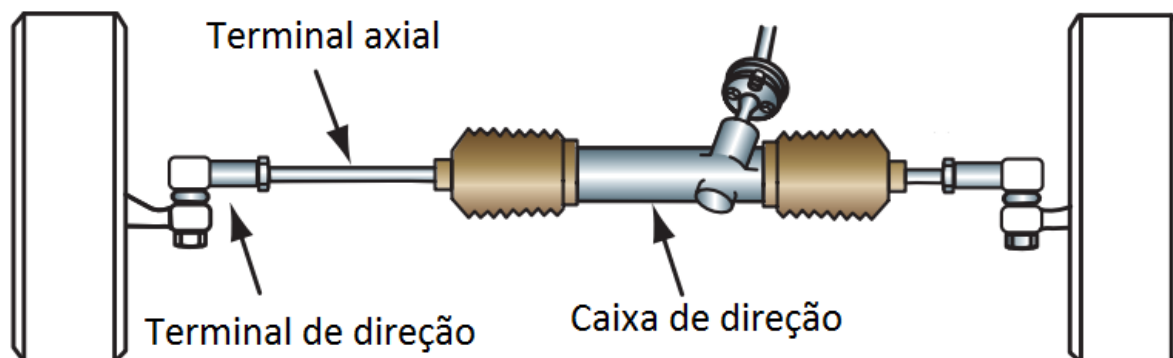


Figura 2 - Representação esquemática do sistema de direção do tipo pinhão e cremalheira.
Fonte: Automotive Suspension and Steering Systems. Modificado (5)

Terminais de direção podem permitir uma angulação que pode chegar a $\pm 30^\circ$ entre o eixo do pino e o eixo do alojamento da carcaça e são colocados no carro da maneira mais reta possível para que se diminuam esforços de flexão. A força necessária para entortar o terminal deve ser consideravelmente maior do que as forças normalmente aplicadas durante a operação (2). Em um carro da categoria M1 estas forças podem ultrapassar ± 3 kN quando ocorrer uma frenagem no veículo durante uma curva e podem ultrapassar ± 6 kN na carcaça do terminal caso o motorista suba com o carro no meio-fio (6).

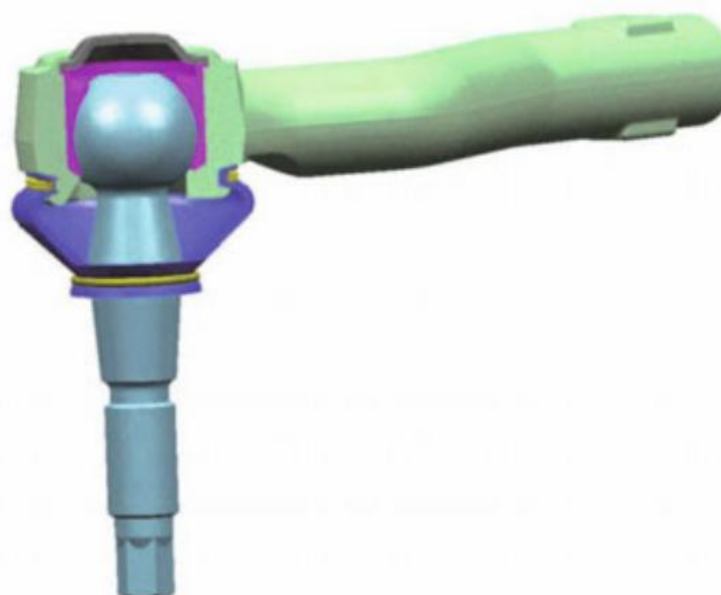


Figura 3 - Representação esquemática de um terminal de direção, com carcaça (verde), tampa seladora (marrom), bucha (rosa), coifa (roxo) e pino esférico (cinza).
Fonte: Chassis Handbook (2).

3.1.2 Pinos esféricos de terminais de direção

Pinos esféricos de terminais de direção tem a função de conectar o terminal ao montante e são inseridos de forma permanente no alojamento da carcaça (3). Convencionalmente são fabricados a partir de aço temperado e revenido, e.g. 41Cr4, 42CrMo(S)4 e 41Cr(S)4 (1) (7), na forma de barras laminadas a quente (7). A Portaria 247/13 do INMETRO estabelece que os pinos devem ser fabricados a partir de aço ligado e não podem ser produzidos com aço ressulfurado (8).

As barras de aço utilizadas geralmente passam por tratamentos térmicos de recozimento subcrítico para facilitar etapas posteriores de conformação a frio. Antes da conformação é comum haver uma etapa de fosfatização (7). Após a fosfatização as barras são conformadas a frio em diversas etapas até obter as dimensões planejadas conforme Figura 4, e a resistência mecânica do pino é determinada pelo tratamento térmico de têmpera e revenimento. A forma final é obtida por usinagem e laminação. Na Figura 5 pode ser vista uma representação esquemática de pinos esféricos acabados com diferentes formatos. Pequenas adições de enxofre podem ser utilizadas para facilitar a usinagem do item (7). A legislação brasileira exige que o limite de resistência à tração para estes componentes seja de 820 a 1250 MPa, calculada a partir de conversão de dureza (8).

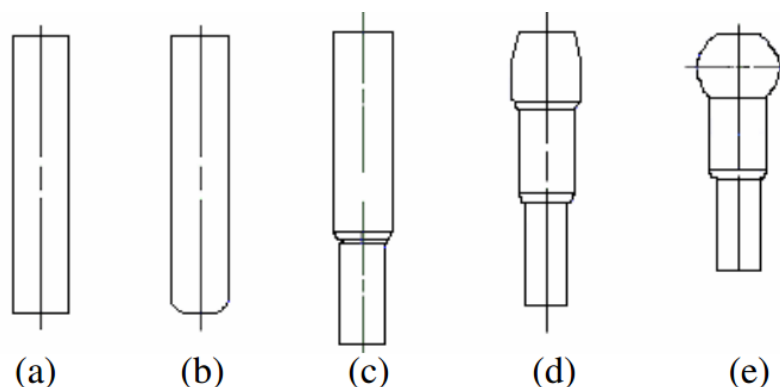


Figura 4 - Representação esquemática de processo de conformação a frio de pinos esféricos em quatro etapas: (a) forma inicial, (b) processo de arredondamento, (c) extrusão reversa, (d) conformação da pré-forma e (e) conformação da esfera. (9)

Como a maior causa de falha de terminais de direção é por causa de corrosão e desgaste devido a contaminação de água e sujeira, alguns fabricantes aplicam tratamentos termoquímicos, e.g. carbonitretação, para aumentar a vida útil da peça (2)(3). Porém, já existem estudos sobre pinos esféricos de terminais de direção produzidos em aço inoxidável e aço microligado e endurecidos por encruamento (1) (7) que poderiam minimizar estas falhas.

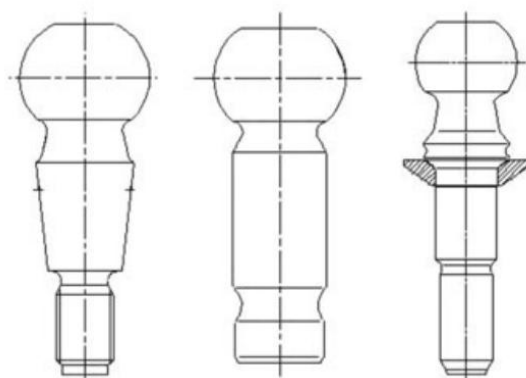


Figura 5 - Variações de desenho de pinos de terminais de direção
Fonte: Chassis Handbook (2)

O diâmetro nominal da esfera de pinos de terminal de direção geralmente varia entre 22, 25 e 27 mm (2), e os pinos podem ser categorizados em famílias de acordo com este diâmetro, conforme é mostrado na Tabela 1 (10).

Tabela 1 - Classificação de pinos em famílias de acordo com a norma ABNT NBR 16130 (10)

Família	Ø Nominal da esfera (mm)
1	$19 < \varnothing \leq 27$
2	$27 < \varnothing \leq 29$
3	$29 < \varnothing \leq 34$
4	$34 < \varnothing \leq 45$
5	$45 < \varnothing \leq 50$

3.1.3 Regulamentações e legislações

A fim de regulamentar critérios mínimos de segurança a serem atendidos por terminais e barras de direção, bem como barras de ligação e terminais axiais, de veículos automotivos comercializados em território nacional, foi lançada em maio de 2013 a Portaria 247/13 do INMETRO (8). Ela estabelece requisitos mínimos de aceitação muito semelhantes aos da norma ABNT NBR 16130: Veículos rodoviários automotores — Terminais de direção, barras de direção, barras de ligação e conjuntos de barras axiais — Requisitos e métodos de ensaio aplicados a veículos categorias M e N e categorias G e O (quando aplicável) (10). Estes critérios são divididos entre requisitos gerais, relacionados ao desenho e a existência de trincas no produto, e requisitos específicos, que estão principalmente relacionados a:

- Integridade dos materiais;
- Isenção de defeitos do tipo trincas;
- Acabamento superficial;
- Processos de formação de roscas externas;
- Microestrutura;
- Resistência mecânica (obtida através de conversão de dureza);
- Endurecimento superficial (quando aplicável);
- Resistência ao impacto;
- Torque de rotação do pino esférico do conjunto terminal de direção;
- Resistência ao arrancamento do pino esférico do conjunto terminal de direção (8).

Tanto a Portaria 247/13 do INMETRO quanto a norma ABNT NBR 16130 estabelecem que pinos de terminais de direção devem ser temperados e revenidos, com limite de resistência à tração convertida por dureza de 820 a 1250 MPa e que devem resistir a um impacto de 110 J sem apresentar descontinuidades superficiais caso ocorra uma deformação permanente de até 20° no pino (8)(10). Porém, é possível encontrar na literatura estudos que mostram que é possível atingir os mesmos níveis de resistência mecânica, vida em fadiga e resistência ao impacto através do processo de endurecimento por encruamento (1) (7).

3.2 Matérias-primas e utilizadas em pinos de terminais de direção

Como os pinos esféricos geralmente são produzidos por conformação a frio e usinagem, entre as escolhas típicas de matéria-prima estão os aços DIN 41Cr4 e DIN 42Cr(S)Mo (7). Como a Portaria 247/13 do INMETRO requer que a matéria-prima utilizada esteja conforme a norma ABNT NBR NM 87 (Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química), fabricantes brasileiros podem utilizar aços de composição química e propriedades equivalentes, tais como os aços COPANT 5140 e COPANT 4140 (11).

3.2.1 Aço DIN 41Cr4 (COPANT 5140)

O aço DIN 41Cr4, considerado equivalente aos aços COPANT 5140 (11) ou AISI 5140 (12), é um aço de médio carbono, baixa liga (12) e de média conformabilidade para conformação a frio (13). É frequentemente usado em diversos componentes automotivos onde não é necessária uma alta resistência mecânica e é, em geral, mais barato que o aço DIN 42CrMo4. Sua composição nominal pode ser observada na Tabela 2, e é semelhante à do aço DIN 42CrMo4 com exceção da quantidade de Molibdênio como elemento de liga. Caso sejam necessários maiores valores de dureza e de resistência à tração, pode ser tratado termicamente através de austenitização, têmpera e revenimento. É importante ressaltar que a adição de Molibdênio ajuda a diminuir a fragilização por revenido em aços de médio carbono (12).

Tabela 2 - Composição nominal dos aços DIN 41Cr4 e DIN 42CrMo4, em porcentagem de massa (12)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
41Cr4	0.38-0.45	≤.40	0.60-0.90	≤0.35	≤0.35	0.90-1.20
42CrMo4	0.38-0.45	≤.40	0.60-0.90	≤0.35	≤0.35	0.90-1.20	0.15-0.30	...

O aço DIN 41Cr4 pode ser adquirido nas formas de barras quadradas ou redondas, em estado laminado, trefilado, normalizado, recozido ou esferoidizado (14). A dureza esperada para cada estado de tratamento térmico pode ser encontrada na Tabela 3. No caso de ser endurecido por têmpera e revenimento, o aço pode ser austenetizado em uma temperatura de 850 °C e temperado em óleo ou água (15) e revenido em temperaturas entre 500 e 650 °C (12). Como pode ser observado na Figura 7, temperaturas mais baixas de revenimento (como 450 °C) reduzem consideravelmente o alongamento antes da ruptura se comparadas com temperaturas mais elevadas (12). Na Figura 6 está representado o diagrama de transformação em resfriamento contínuo para o aço DIN 41Cr4 onde mostra que a matéria prima deve em menos de , aproximadamente, trinta segundos para que ocorra a formação de martensita(16).

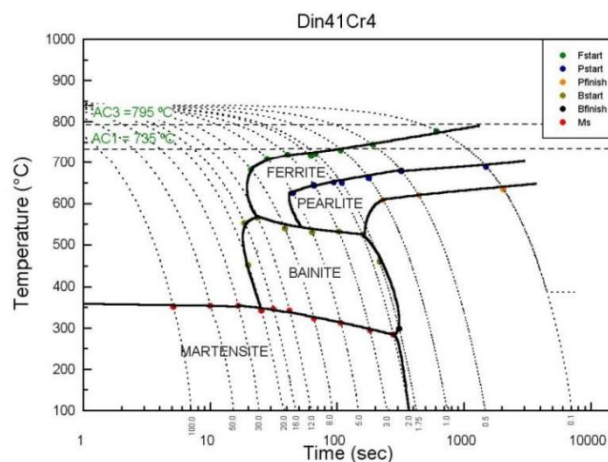


Figura 6 - Diagrama de transformação em resfriamento contínuo para o aço DIN 41Cr4.
Fonte: Lume UFRGS (16)

Tabela 3 - Valores esperados de dureza para os aços 41Cr4 e 41CrMo4 em HV (14)

Material	Normalizado	Recozido	Esferoidizado
41Cr4	180-300	Máx. 205	Máx. 180
42CrMo4	237-370	Máx. 225	Máx. 187

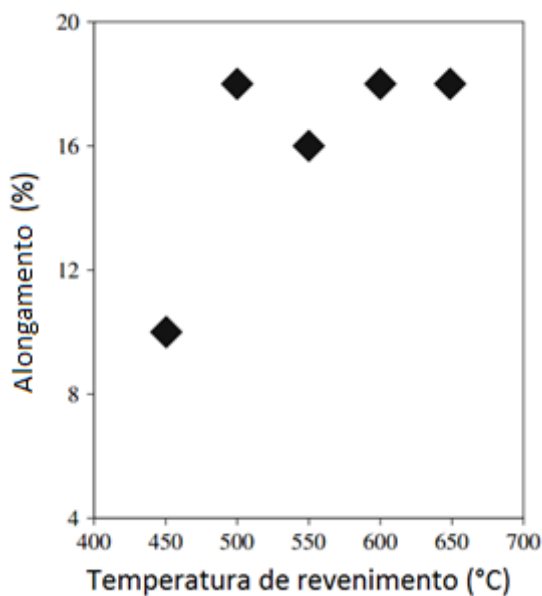


Figura 7 - Alongamento total antes da ruptura em relação à temperatura de revenimento do aço DIN 41Cr4. Modificado (12)

3.2.2 Aço DIN 42CrMo4 (COPANT 4140)

O aço DIN 42CrMo4, considerado equivalente aos aços COPANT 4140 (11) ou AISI 4140 (12), é um aço de médio carbono, baixa liga (12) e de média conformabilidade para conformação a

frio (13). É frequentemente usado em componentes automotivos onde uma alta resistência mecânica é necessária e é, em geral, mais caro que o aço DIN 41Cr4. Sua composição nominal pode ser observada na Tabela 2, e é semelhante à do aço DIN 41Cr4 com exceção da quantidade de Molibdênio como elemento de liga. Pode ser tratado termicamente através de austenitização, têmpera e revenimento, e problemas como fragilização por revenido podem ser ultrapassados devido ao teor de Molibdênio contido neste aço.

Assim como o DIN 41Cr4, pode ser adquirido nas formas de barras quadradas ou redondas, em estado laminado, trefilado, normalizado, recozido ou esferoidizado. Porém, é mais comum de ser encontrado com sua designação na norma SAE ou COPANT em catálogos nacionais (14). A dureza esperada para cada estado de tratamento térmico pode ser encontrada na Tabela 3. No caso de ser endurecido por têmpera e revenimento, o aço pode ser austenetizado em uma temperatura de 860 °C e temperado em óleo (17) e revenido em temperaturas entre 450 e 600 °C. Como pode ser observado na Figura 9, não há mudanças perceptíveis no alongamento total antes da ruptura entre estas temperaturas, havendo um aumento somente entre 600 e 650 °C (12). Na figura está representado o diagrama de transformação em resfriamento contínuo para o aço DIN 42CrMo4 onde mostra que a matéria prima deve em menos de , aproximadamente, quarenta segundos para que ocorra a formação de martensita(18)

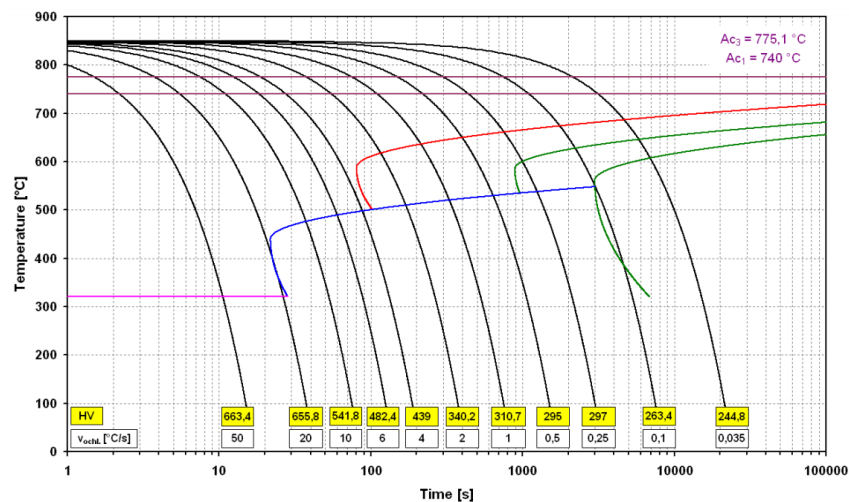


Figura 8 - Diagrama de transformação em resfriamento contínuo para o aço DIN 42CrMo4 (18).

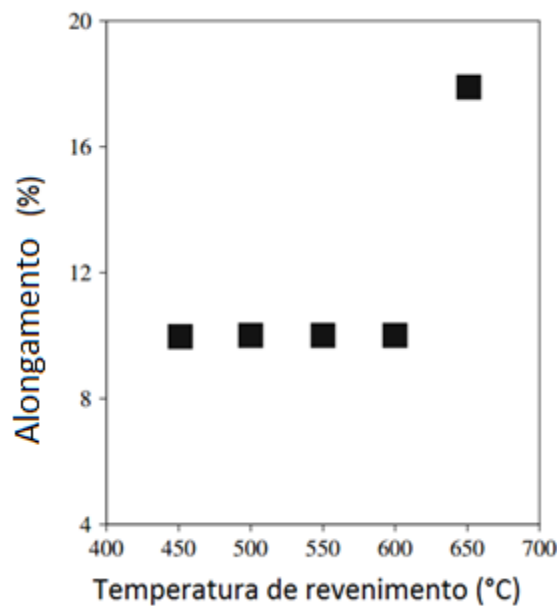


Figura 9 - Alongamento total antes da ruptura em relação à temperatura de revenimento do aço DIN 42CrMo4. Modificado (12)

3.2.3 Aço DIN 41Cr4 vs. Aço 42CrMo4

Tanto o aço DIN 41Cr4 e o aço 42CrMo4 são utilizados frequentemente em aplicações automotivas como virabrequim, eixos dianteiros e componentes de direção (12), sendo comumente empregados em pinos esféricos de terminais de direção (1) (7). Como pode ser visto na Tabela 2, ambos tem composição química bastantes semelhante com exceção da quantidade de Molibdênio utilizado como elemento de liga. Conforme a Tabela 3, o aço 42CrMo4 apresenta valores mais elevados de dureza em seu estado normalizado(13). Essa diferença pode ser explicada devido justamente à diferença do teor de molibdênio nos dois aços, uma vez que este elemento atua como elemento endurecedor para ligas de aço (19). Como em processos de conformação a frio é necessário que o aço possua baixa dureza (13), o aço DIN 42CrMo4 possui menor conformabilidade para conformação à frio se comparado com o aço DIN 41Cr4 com o mesmo tratamento térmico, podendo ser necessários tratamentos térmicos com temperaturas mais elevadas nele para que ambos sejam conformados com a mesma facilidade.

A Portaria 247/13 do INMETRO especifica que pinos esféricos de terminais de direção devem apresentar resistência à tração convertida por dureza de 820 à 1250 MPa (8), o que se equivale à, aproximadamente, 265 até 400 HV para os aços DIN 41Cr4 e 42CrMo4 (20) . Como pode ser visto na Figura 10, com uma menor temperatura de revenimento o aço DIN 41Cr4 pode obter a mesma dureza que o aço DIN 42CrMo4. Em suma, o aço DIN 41Cr4 além de ser mais barato que o aço DIN 42CrMo4 (12), não necessita tanto de tratamentos térmicos para que seja forjado (14) e pode ser revenido a temperaturas inferiores para que se obtenha as mesmas propriedades mecânicas do DIN 42CrMo4 (12). Conforme é mostrado na Figura 11, o aço DIN 42CrMo4 tem melhor desempenho em fadiga se comparado ao aço DIN 41Cr4 nas mesmas condições (12), o que o torna preferível em aplicações onde a vida em fadiga for um fator limitante. Como em terminais de direção a maior causa de falha é corrosão e desgaste causada por entrada de água e contaminantes no alojamento (3), o aço DIN 41Cr4 pode ser considerado preferível do ponto de vista do custo para ser aplicado em pinos esféricos de terminais de direção.

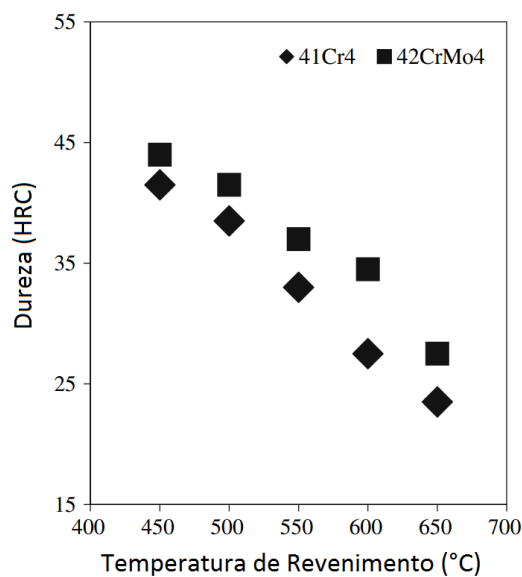


Figura 10 - Dureza em relação à temperatura de revenimento dos aços DIN 41Cr4 e DIN 42CrMo4. Modificado (12)

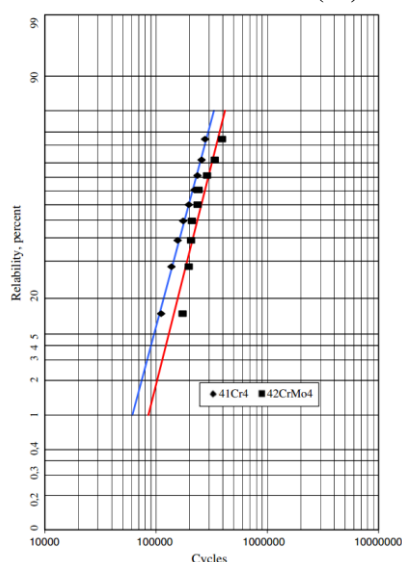


Figura 11 - Comparação de vida em fadiga dos aços DIN41Cr4 e DIN42CrMo4 (12)

3.3 Ensaios mecânicos

Tanto a portaria 247 de 2013 do INMETRO quanto a NBR 16130 estabelecem ensaios mecânicos a serem realizados em pinos de terminais de direção para que se garanta a integridade do material no produto final. Para pinos esféricos das Famílias 1 e 2 são exigidos ensaios de dureza e de impacto (8) (10).

3.3.1 Dureza

A dureza de um material pode ser considerada com a medida da resistência de um material à deformação plástica localizada(21). Existem diversos métodos diferentes para a determinação da dureza de um material, podendo se fazer através de um risco, de uma impressão ou de maneira dinâmica, e a natureza do método a ser empregado dependerá da aplicação do produto e do material a ser testado (22). Em geral, ensaios de dureza são utilizados pela sua praticidade, por serem considerados ensaios não destrutivos, por serem baratos e por poder relacionar outras propriedades do material ao resultado do ensaio, como a resistência à tração (21).

Em sua maioria, ensaios de dureza quantitativos envolvem a atuação de um penetrador ou indentador a ser forçado contra a superfície de um material, onde é medida a profundidade ou tamanho da impressão deixada por ele. Quanto maior e mais profunda for a impressão mais macio é o material e menor será o seu valor de índice de dureza (21). Dentre os métodos de determinação de dureza por penetração está o método Rockwell, mais amplamente utilizado na indústria, método Brinell, primeiro método por penetração amplamente aceito, o método Vickers e método Knoop (22).

3.3.1.1 Ensaio de dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers utiliza um penetrador piramidal de diamante, com ângulo de 136° entre as faces opostas da pirâmide. Devido ao formato do penetrador este método também é conhecido como teste de pirâmide de diamante (21) (22). A dureza Vickers é definida como sendo a carga dividida pela área superficial da impressão, que é calculada através de medições com auxílio de um microscópio das distâncias entre vértices opostos da impressão. O número de dureza Vickers (VHN), então, pode ser calculado pela seguinte fórmula(22),

$$VHN = \frac{2P \sin(\theta/2)}{L^2} = \frac{1.854P}{L^2}$$

onde: P = carga aplicada, kg

L = distância média entre as diagonais, mm

θ = ângulo entre faces opostas do diamante = 136°

O ensaio de dureza Vickers foi amplamente aceito para trabalhos de pesquisa pelo fato de apresentar uma escala contínua de dureza para uma dada carga, diferente de métodos como Rockwell que apresentam diversas escalas relacionadas ao penetrador e à carga aplicada, podendo variar entre 5 até 1500 dependendo da dureza do material. As cargas, em geral, variam de 1 até 120 kgf dependendo do material a ser testado (22). Outra vantagem deste método é a possibilidade de se realizar medidas em amostras embutidas (23).

Em geral, ensaios de dureza Vickers não são utilizados para inspeções de rotina devido a sua falta de praticidade e lentidão de medição, necessidade de uma boa preparação da superfície e permitir uma probabilidade maior de erro operacional durante o ensaio (22). Atualmente, porém, já existem aparelhos automatizados com o acoplamento do dispositivo penetrador a um analisador de imagens incorporado a um computador e um software. O software é capaz de controlar diversos parâmetros do ensaio, como a posição das impressões, a distância entre elas e a representação gráfica dos resultados (21).

3.3.1.2 Conversão da dureza

Muitas vezes é desejável que se converta valores de dureza obtidos em um ensaio para uma escala de outro método de aferição. Porém, como dureza não é uma propriedade bem definida dos materiais um sistema de conversão abrangente não foi desenvolvido. Os dados de conversão mais confiáveis são de aços em escalas Brinell, Rockwell C e Rockwell B. Sempre deve ser tomado cuidado na extrapolação de um valor de dureza em uma escala para outra (21).

3.3.1.3 Relação entre dureza e resistência à tração

Tanto a resistência à tração quanto a dureza são indicadores da resistência de um material à deformação plástica. Devido a isto existe certa proporcionalidade entre estas duas propriedades, conforme está ilustrado na Figura 12 (21). Devido a isto, foram criados métodos para conversão de

valores de dureza para resistência à tração. Estes métodos foram criados de maneira experimental e basicamente empírica, considerando relação que a complexa distribuição de tensões gerada pela impressão do ensaio de dureza com distribuição de tensões gerada em um ensaio de tração (22).

Estes métodos já apresentaram resultados coerentes para diversos metais como aço, cobre e alumínio e são, em geral, aceitos para a determinação de resistência à tração em corpos de prova que impossibilitem ensaios de tração (22). Em geral, o limite de resistência à tração pode ser calculado a partir de valores de dureza Brinnel conforme a seguinte fórmula (21),

$$LRT = 3,45HB$$

onde, LRT = Limite de resistência à tração, MPa

HB = Valor de dureza Brinnel.

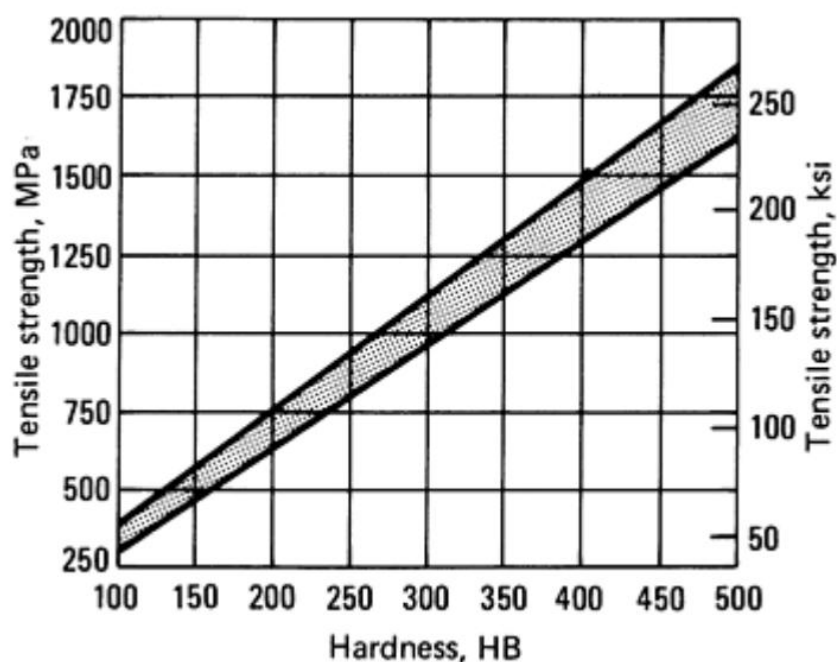


Figura 12 - Relação entre dureza e resistência a tração para aços temperados e revenidos, como laminado, ou laminado para aços ao carbono ou ligados.

Fonte: ASM Metals Handbook Volume 1 (19)

Esta conversão de dureza para resistência mecânica também pode ser realizada através de normas específicas, como a norma ISO DIN EN 18265 (20) e ASTM A370 (24)

3.3.2 Ensaios de impacto

Diversos ensaios foram concebidos para se avaliar a tendência de um material a se comportar de maneira frágil. Estes ensaios são capazes de detectar diferenças nos materiais que ensaios padrão de tração não são. Os resultados obtidos por estes ensaios não são expressos em termos de requisitos de desenho, uma vez que muitos destes ensaios utilizam corpos de prova com um entalhe e não é possível avaliar a condição de tensões triaxiais nestes entalhes (22).

O entalhe tem função de simular um defeito no corpo de prova a ser ensaiado e induzir a fratura naquela região. Nos Estados Unidos a técnica mais utilizada é conhecida como Ensaio Charpy, que consiste em atingir o corpo de prova com um pêndulo e medir a energia desperdiçada no impacto. O pêndulo tem peso pré-determinado e é solto de uma altura h enquanto um corpo de prova

em forma de barra fica posicionado na base, conforme ilustrado na Figura 13(21). No método de ensaio Charpy o pêndulo atinge o corpo de prova a uma velocidade de, aproximadamente, 5 m/s (22).

Outro método de ensaio bastante conhecido é o Ensaio Izod. Ele é similar ao método Charpy, com a diferença na configuração do corpo de prova. No método Izod o corpo de prova é engastado em uma de suas extremidades à base, enquanto no método Charpy o corpo de prova é apoiado sobre suas duas extremidades, como pode ser visto na Figura 14. Outra diferença é a posição do entalhe, enquanto no método Charpy o entalhe é feito no centro da face oposta àquela que receberá o impacto, no método Izod o entalhe é feito próximo ao engaste e na mesma face que recebe o impacto (22).

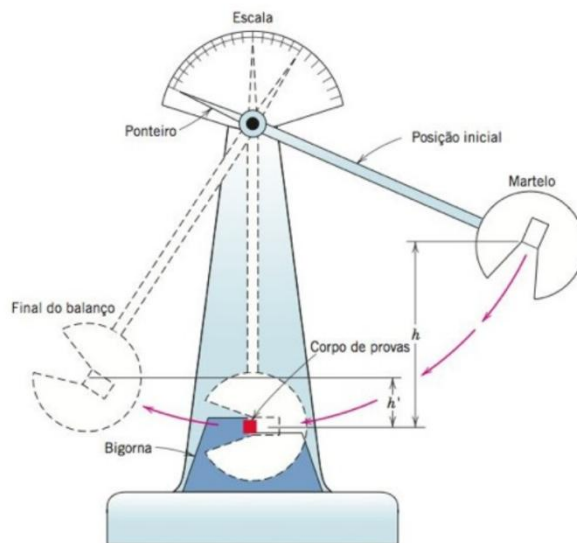


Figura 13 - Representação esquemática do ensaio de dureza por impacto.
Fonte: Ciência dos Materiais: Uma Introdução (21)

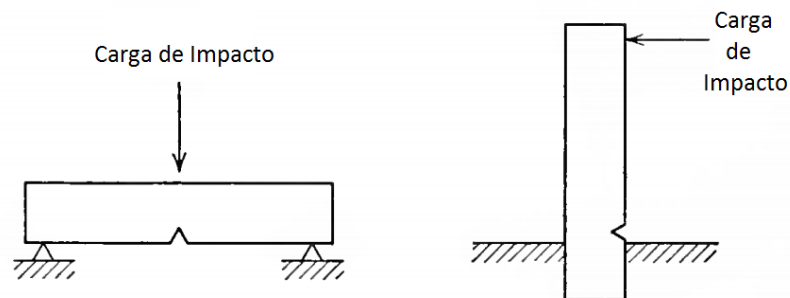


Figura 14 - Representação esquemático dos corpos de prova dos ensaios de Charpy (esquerda) e impacto IZOD (direita)
Fonte: Metalurgia Mecânica (22)

3.4 Processos de endurecimento

Um dos processos mais comuns a ser empregado para o endurecimento de materiais de uso comum de engenharia é o processo de endurecimento por têmpera e revenimento, onde, no aço, ocorre a transformação de austenita em martensita através do cisalhamento da rede cristalina(22). O processo de trabalho a frio em metais, porém, também gera o endurecimento e aumento de

resistência mecânica do material, podendo por vezes gerar produtos com propriedades mecânicas apropriadas para a sua aplicação (25).

3.4.1 Endurecimento por têmpera e revenimento

Têmpera é a denominação que se dá ao tratamento térmico que envolve o resfriamento rápido de um metal que está em temperatura de austenitização ou de solubilização. Na maioria dos aços, como aços carbono ou de baixa liga, o tratamento térmico de têmpera é utilizado para se produzir uma quantidade controlada de martensita em sua microestrutura (26). A martensita é a microestrutura mais dura e mais resistente que pode ser produzida em um aço. Entretanto, é também a mais frágil e sua ductilidade pode ser considerada desprezível (21). Como este tratamento térmico envolve o resfriamento rápido, a difusão não tem efeito considerável na transformação microestrutural que ocorre devido a ele, fazendo com que a martensita tenha a mesma composição que a austenita. A martensita é uma fase única de aços, com sua própria estrutura cristalina, composição e é separada por uma interface clara de outras fases, além de ser uma estrutura metaestável devido à supressão da difusão durante sua transformação (27).

A morfologia da martensita se assemelha a placas e ripas (27). Um tratamento térmico de têmpera bem sucedido significa obter a microestrutura, dureza, resistência mecânica e tenacidade desejadas e ao mesmo tempo minimizar tensões residuais, distorções dimensionais e possibilidade de surgimento de trincas na peça (26).

Para isto, o meio de resfriamento deve ser corretamente selecionado de acordo com: as propriedades desejadas, a temperabilidade da liga, as dimensões e formatos da peça envolvidos e taxa de resfriamento necessária para que se obtenha a microestrutura esperada. Entre os meios de resfriamento mais comuns estão o óleo (que pode conter uma variedade de aditivos), água e soluções poliméricas aquosas (26).

Distorções dimensionais na peça e possibilidade de aparecimento de trincas são limitantes na hora de se escolher o meio de resfriamento mais adequado. Meios que promovam um resfriamento mais severo, como água, tendem a ser capazes de transformar a microestrutura mais eficientemente (dependendo da temperabilidade do metal), porém aumentam o risco de defeitos dimensionais e do surgimento de trincas na peça. Já meios mais brandos, como óleo, tendem a não gerar tanta tensão residual no material, porém podem não ser eficientes o suficiente para que se tenha uma mudança microestrutural em maiores profundidades na peça (26).

Apesar de sua elevada dureza, a martensita é muito frágil e não pode ser empregada na maioria das aplicações, além de possuir tensões internas excessivas que podem reduzir sua resistência mecânica. Para evitar este problema, realiza-se o tratamento térmico posterior ao de têmpera chamado de revenimento (21). Como a estrutura martensítica é altamente instável devido à supersaturação de átomos de carbono no retículo cristalino de sua estrutura tetragonal de corpo centrado, este tratamento térmico transforma a martensita em martensita revenida, constituída por ferrita e cementita, através de difusão (27).

A microestrutura da martensita revenida possui, em geral, uma morfologia com aparência de ripas e placas (27). Já para temperaturas mais altas de revenimento, como 500 a 600 ° C, a microestrutura da martensita se assemelha àquela de aços que passaram por tratamento térmico de esferoidização: partículas de cementita pequenas em uma matriz ferrítica, com exceção de que as partículas de cementita são muito menores na martensita revenida. Isso faz com que o aço em questão tenha uma dureza quase tão alta quanto a do mesmo com microestrutura martensítica, porém com ductilidade e tenacidade aumentadas (21). Como a deformação plástica em materiais se dá através do deslocamento de discordâncias (21)(25), as propriedades de um aço temperado e revenido dependem, então, da distribuição e forma das partículas de cementita, que irá reforçar a matriz

ferrítica e atuar como barreiras contra o movimento de discordâncias (21). Sendo a transformação governada pela difusão, a temperatura e tempo do tratamento térmico de revenimento são duas de suas principais variáveis, assim como a composição do aço (26). Na Figura 15 está representada a relação entre resistência à tração, limite de escoamento e a ductilidade em função da temperatura de revenimento de um aço de baixa liga (tipo SAE 4340).

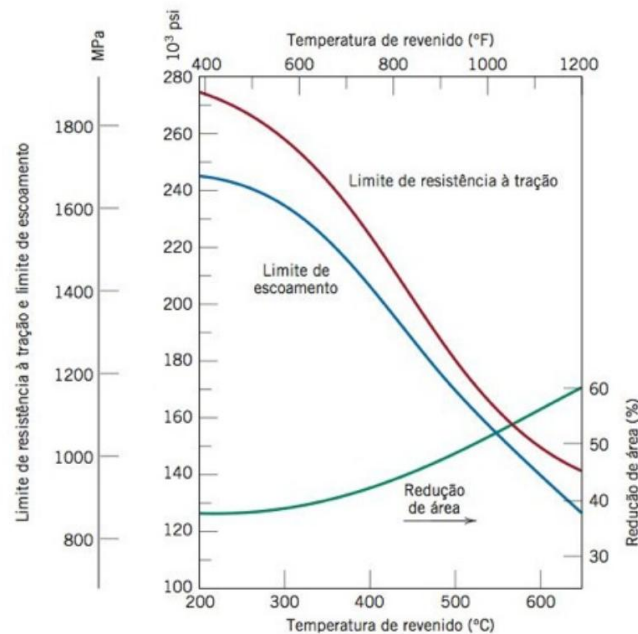


Figura 15 - Relação entre resistência à tração, limite de escoamento e a ductilidade em função da temperatura de revenimento de um aço de baixa liga (tipo SAE 4340). Retirado de Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução (16)

Em suma, um aço com tratamento térmico bem efetuado de têmpera e revenimento é capaz de obter altos valores de dureza e resistência à tração, sendo necessário que o revenimento seja realizado em uma temperatura adequada para que o produto final não seja frágil ou insuficientemente dúctil (26)(21). Através deste processo de endurecimento, aços como DIN 41Cr4 ou DIN 42CrMo4, comumente empregados na produção de pinos esféricos de terminais de direção, podem obter facilmente durezas entre 255 e 400 HV com temperaturas de revenimento entre 500 e 650 °C (12).

3.4.2 Endurecimento por encruamento

O processo de endurecimento por encruamento é o aumento de dureza e resistência mecânica, consequentemente com perda de ductilidade, de um metal causado pela deformação plástica do trabalho a frio (25). Em um material policristalino, como o aço, diferentes grãos apresentarão diferentes direções de escorregamento durante a deformação plástica, e a integridade mecânica e coesão entre os grãos são mantidas ao longo dos contornos de grão. Logo, a deformação de cada grão individual está restrita à deformação de seus grãos vizinhos, conforme é mostrado na Figura 16, onde está exemplificado como grãos se tornam alongados no sentido da deformação (21).

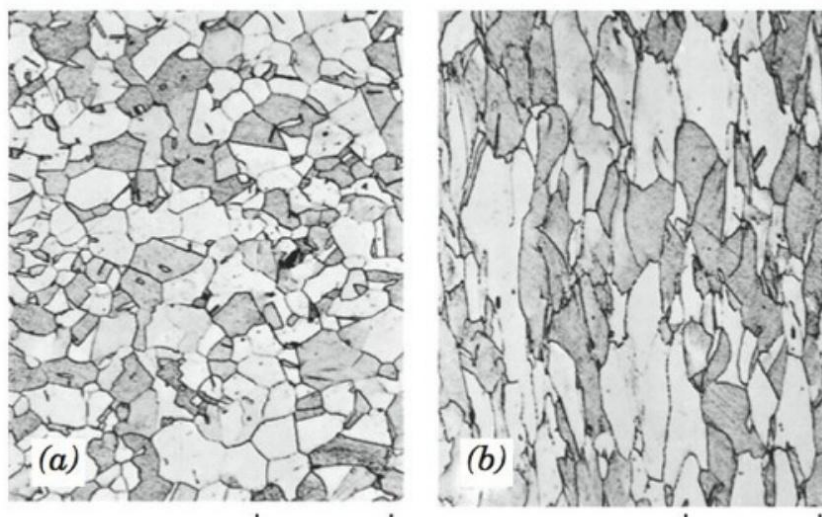


Figura 16 - Alteração na estrutura de grãos de um material policristalino após deformação plástica. (a) Grãos equiaxiais antes da deformação e (b) Grãos alongados devido à deformação (16).

O escorregamento que ocorre durante a deformação plástica já foi observado em amostras metálicas suficientemente polidas através da observação de linhas de escorregamento, e já há evidências que confirmam a teoria de deslocamento de distorções (25). Em materiais metálicos policristalinos é possível se observar linhas de escorregamento no interior dos grãos e que estas linhas de escorregamento não são coerentes entre um grão e outro. Ou seja, como o escorregamento ocorre na direção mais favorável dentro de cada grão (21), a direção de escorregamento não será necessariamente igual em grãos adjacentes. Linhas de escorregamento não ultrapassam o contorno de grão, portanto, contornos de grão são barreiras que impedem ou dificultam o deslocamento de discordâncias. Estruturas com tamanhos de grão mais fino, então, tendem a adquirir mais resistência mecânica com o trabalho a frio, pois são mais eficientes ao conter a movimentação de discordâncias em sua estrutura (25). Em aços com microestrutura formada por ferrita e perlita, a presença da fase eutetóide reduz o caminho livre que as discordâncias podem percorrer pela fase ferrítica. Como resultado, a perlita restringe de maneira eficiente a movimentação de discordâncias pelo material devido à sua estrutura lamelar e facilita o aumento de resistência mecânica durante o encruamento (22). Na Figura 17 é possível ver uma amostra de um material metálico policristalino após o mesmo ter sido submetido a uma deformação.

Em suma, em materiais metálicos a deformação plástica ocorre através do deslocamento e geração de discordâncias. Durante a deformação, a densidade de discordâncias do material aumenta. Uma amostra de aço recozida, por exemplo, apresenta de 10^6 a 10^8 discordâncias por centímetro quadrado enquanto uma amostra de aço severamente deformado pode apresentar até 10^{12} discordâncias por centímetro quadrado (22). Como as interações entre discordâncias são em média repulsivas, a mobilidade das discordâncias diminui, conseqüentemente dificultando a deformação do metal. Além disto, contornos de grão e precipitados na matriz metálica atuam como barreiras para o deslocamento de discordâncias. O processo de endurecimento por encruamento ocorre, então, devido à junção destes fatores durante o trabalho a frio (21).

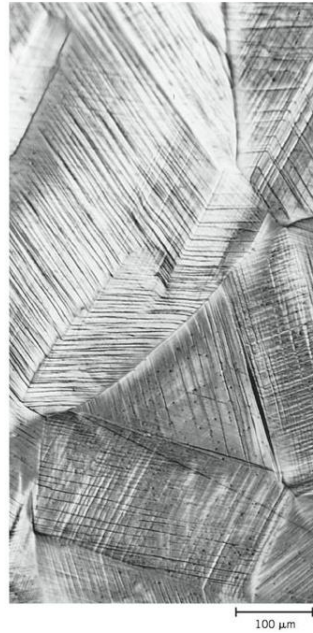


Figura 17 – Linhas de escorregamento em uma amostra de um material metálico policristalino após o mesmo ter sido deformado. É possível observar que diferentes grãos apresentam diferentes direções de escorregamento e que as mesmas não ultrapassam os contornos de grão (16).

3.5 Análise metalográfica

A análise metalográfica se configura na examinação e determinação da constituição e da estrutura de metais e suas ligas. A análise pode ser feita com uma vasta variedade de escalas, desde inspeções manuais ou baixas magnificações ($\sim 20\times$) até aumentos maiores com ($+1000000\times$) com o uso de microscópios eletrônicos. Entretanto, o instrumento mais comum a ser utilizado em uma análise metalográfica é o microscópio óptico, com aumentos que variam entre ~ 50 e $1000\times$ e a capacidade de resolver detalhes de até $0,2\ \mu\text{m}$ (28).

Normalmente é necessária uma preparação cuidadosa e meticulosa da superfície da amostra a ser examinada para que se revelem detalhes importantes de sua microestrutura. Inicialmente a zona de interesse deve ser lixada e polida até se atingir um acabamento liso e especular. Isso é atingido através do uso de lixas e pós abrasivos de granulometria progressivamente mais fina. A microestrutura é revelada, em geral, através de um tratamento de superfície com o uso de um reagente químico apropriado em uma etapa de ataque químico. Em materiais monofásicos, a reatividade química de cada grão pode depender de sua orientação cristalográfica. Já em materiais policristalinos a característica apresentada varia de grão para grão (21). A Figura 18 ilustra três grãos com orientação cristalográfica diferente atacados quimicamente sendo incididos por uma luz perpendicular, e a Figura 19 ilustra como estes três grãos poderiam ser observados durante a análise.

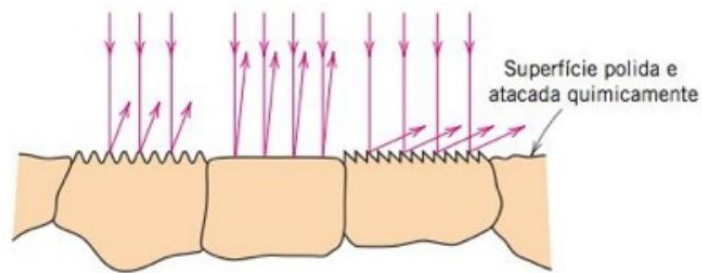


Figura 18 - Luz incidindo em três grãos com orientação cristalográfica diferente atacados quimicamente (21)

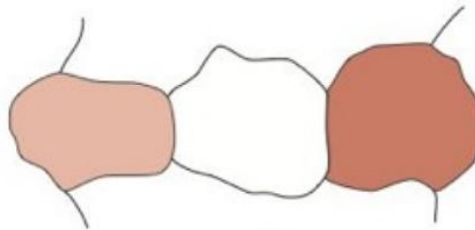


Figura 19 - Representação figurativa de três grãos com orientação cristalográfica diferente após serem atacados quimicamente (21)

Para uma correta preparação da superfície da amostra, pode ser necessário o embutimento da mesma para se facilitar o manuseio nas etapas de lixamento e polimento. Este embutimento geralmente é realizado com o uso de resinas poliméricas ou com dispositivos mecânicos. Há diversas vantagens em se embutir a amostra, principalmente quando a amostra é manuseada manualmente durante o polimento e quando as bordas da amostra fazem parte da região de interesse. Outras vantagens são a facilidade de se manusear amostras muito pequenas ou frágeis e a contenção de cantos vivos que poderiam danificar os panos utilizados durante o polimento (28).

Para aços, geralmente se utiliza de reagentes que oxidem preferencialmente uma fase específica durante o ataque químico. Para isto, são usados reagentes ácidos que, em contato com o aço, gera taxas de oxidação/redução diferentes para cada fase presente, gerando uma rede de células em miniatura que consistem em pequenas regiões anódicas e catódicas adjacentes. Esta diferença de potencial entre regiões é gerada não só pela composição de cada microconstituente como também por outras irregularidades nos cristais, como contornos de grão (28). Entre os reagentes típicos empregados em aço para revelar sua microestrutura está o Nital, preparado através da mistura de ácido nítrico e etanol ou metanol, e o Picral, preparado através da mistura entre ácido pícrico e metanol ou etanol (29). Na Figura 20, pode ser observada a microestrutura de um aço de DIN 41Cr4 carbono após o ataque químico com Nital 2%.

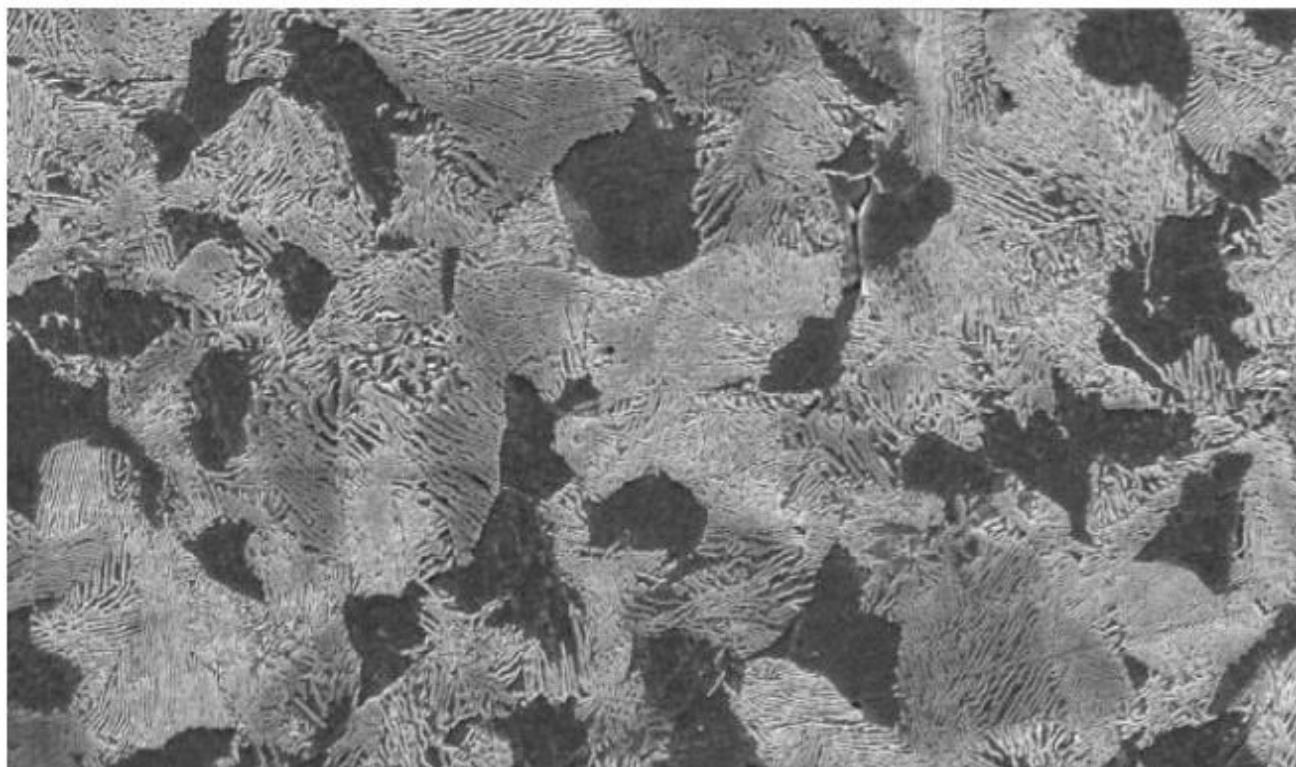


Figura 20 - Microestrutura de aço DIN 41Cr4 como-laminado, formada por ferrita e perlita. Ataque realizado com Nital 2%. Imagens obtidas através de microscopia eletrônica de varredura com aumento original de 4000X (16).

3.6 Inspeção por partículas magnéticas

Inspeção por partículas magnéticas é um ensaio não destrutivo para detecção de descontinuidades superficiais e próximas à superfície em materiais ferromagnéticos. O teste se baseia no fato de que quando uma peça é magnetizada, descontinuidades superficiais que estão em direções geralmente transversais à direção do campo magnético geram campos de fuga nela e em superfícies “acima” delas (30).

A presença de um campo de fuga é detectado através de partículas magnéticas finamente dispersas sobre a superfície da peça, com algumas destas partículas se acumulando sobre o campo. Estas partículas magneticamente acumuladas sobre o defeito geralmente indicam o formato, tamanho e local da descontinuidade detectada. As partículas podem ser aplicadas por via seca, como um pó de partículas de baixa granulometria, ou por via úmida, com as partículas dispersas em um meio como água ou óleo (30).

A inspeção por partículas magnéticas é capaz de detectar descontinuidades superficiais pequenas e que seriam difíceis de serem percebidas a olho nu. Algumas descontinuidades subsuperficiais também são possíveis de serem detectadas por este método, porém com algumas limitações em relação à sua forma e profundidade. Quanto mais profundo for o defeito, maior ele deve ser para que se gere uma indicação relevante (30).

Além de ser necessário que a peça a ser inspecionada seja ferromagnética, este método oferece outras limitações como a dificuldade de se ensaiar amostras pintadas ou com outros revestimentos não condutores, necessidade de limpeza ou desmagnetização da peça em alguns casos e a possibilidade de superaquecimento local no ponto de contato elétrico (30).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na Figura 21 está apresentado um fluxograma da parte experimental desenvolvida neste trabalho.

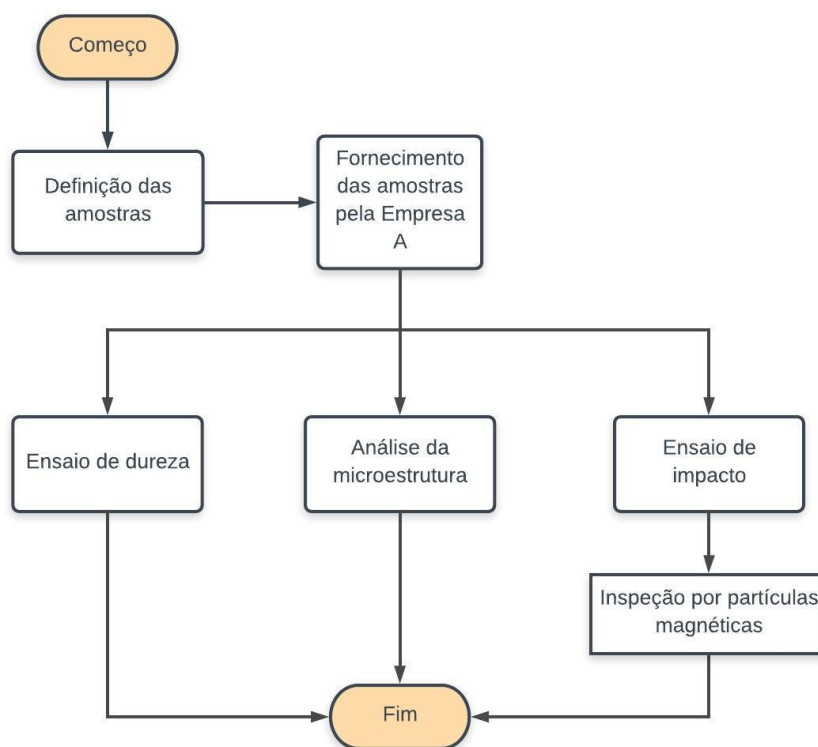


Figura 21 - Fluxograma representativo da parte experimental desenvolvida no trabalho

4.1 Material

As amostras foram fornecidas por uma empresa do setor metal mecânico em sua forma acabada (após usinagem e laminação da esfera) com variações entre corpos de prova endurecidos por encruamento (gerado pela conformação a frio do pino) e endurecidos por têmpera e revenimento. Todas as amostras foram endurecidas por encruamento em sua confecção durante a etapa de conformação à frio, visto que esta etapa faz parte do processo produtivo destes itens. No caso de amostras endurecidas por têmpera e revenimento, o tratamento térmico foi realizado após a etapa de conformação a frio e antes da etapa de usinagem. Elas foram austenitizadas em uma temperatura de 855 °C e resfriadas em óleo. A etapa de revenimento foi realizada em uma temperatura de 560 °C. A relação das amostras produzidas, o diâmetro nominal de sua esfera e sua aplicação estão descritos na Tabela 4.

Todas as amostras foram confeccionadas a partir de aço DIN 41Cr4, se utilizando o mesmo feixe de aço para confecção de amostras de mesma aplicação. A única etapa de alívio de tensões foi realizada após o corte da matéria-prima. Este tratamento térmico foi realizado na temperatura de 700° C durante quatro horas. Foram produzidos vinte corpos de prova para cada variação de forma e processo de endurecimento, totalizando cento e sessenta corpos de prova.

Tabela 4 - Relação das amostras confeccionadas

Amostra	Processo de endurecimento	Diâmetro nominal da esfera	Aplicação	Categoria
CP1E	Encruamento	22 mm	Volkswagen KOMBI	M1
CP1T	Têmpera e revenimento	22 mm	Volkswagen KOMBI	M1
CP2E	Encruamento	23 mm	Ford MUSTANG	M1
CP2T	Têmpera e revenimento	23 mm	Ford MUSTANG	M1
CP3E	Encruamento	27 mm	Chevrolet D20	N1
CP3T	Têmpera e revenimento	27 mm	Chevrolet D20	N1
CP4E	Encruamento	29 mm	TROLLER T4	M1
CP4T	Têmpera e revenimento	29 mm	TROLLER T4	M1

4.2 Métodos

4.2.1 Ensaio de dureza

Foi realizado ensaio de dureza em dois momentos do trabalho: nos corpos de prova, antes da conformação com a matéria-prima cortada e após laminação da esfera do respectivo corpo de prova. Em ambos os casos foi realizado o ensaio em seis corpos de prova para cada variação de amostra. Na matéria-prima a dureza foi medida na escala Rockwell C e B conforme ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008 (31). Estes corpos de prova foram lixados em ambas as faces com lixa de granulometria 60 antes do ensaio. Os corpos de prova acabados foram fresados longitudinalmente em seu eixo central para aferição de dureza em toda sua área. Após, foram embutidos a frio com resina acrílica autopolimerizante de marca JET.

Os ensaios realizados nos pinos endurecidos foram realizados no LACAR (Laboratório de caracterização de materiais da UFRGS) e seguiram o método Vickers com aplicação de 10 kgf de carga. Os pinos endurecidos foram cortados longitudinalmente para que fosse medida a dureza em toda sua área e foram realizadas ao todo onze impressões por corpo de prova, conforme está ilustrado na Figura 22. A conversão de dureza Vickers para resistência à tração seguiu a norma ISO DIN EN 18265 (20).

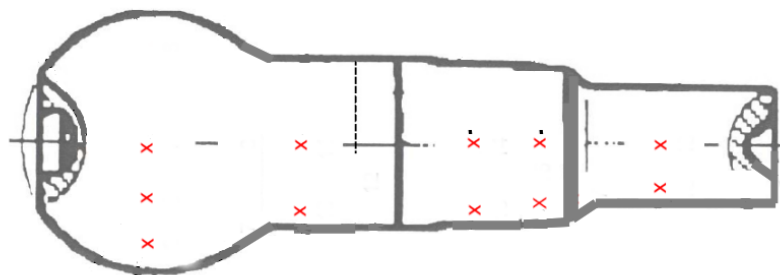


Figura 22- Corpo de prova preparado para ensaio de dureza

4.2.2 Análise da microestrutura

Foi realizada análise da microestrutura conforme ASTM E3 (32) (Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens) no LACAR em seções longitudinais de um corpo de prova de cada amostra. Utilizou-se o reagente Nital 2% para avaliação metalográfica de todas as amostras. As foto micrografias foram realizadas utilizando microscópio ótico Zeiss AxioCam ERC 5s com aumento efetivo de 100, 500 e 1000X. A classificação de sua microestrutura foi feita conforme ABNT NBR 15454 (33).

O tamanho de grão austenítico foi retirado do certificado de qualidade dos aços utilizados como matéria-prima, e foram medidos através do método de intercepto de Heyn.

4.2.3 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto foi realizado no laboratório ISI SIM LABIM (SENAI CETEMP) em um equipamento de impacto CHARPY adaptado para fixação de pinos esféricos de terminais de direção. Os corpos de provas foram mancalizadas em seu cone e foram devidamente fixadas com uso de uma porca adequada para cada formato de rosca, conforme ilustrado na Figura 23. Foram realizados ensaios de impacto em seis corpos de prova de cada amostra. O pêndulo foi ajustado de maneira a atingir o centro da esfera com uma energia de, aproximadamente, 145 J. Foi medido o ângulo de deflexão de cada corpo de prova após o ensaio com auxílio do software Imagej.



Figura 23- Pino engastado em dispositivo projetado para o ensaio de impacto.

4.2.1 Ensaio não destrutivo de partículas magnéticas

Foi realizado ensaio não destrutivo de partículas magnéticas por via úmida conforme ABNT NBR NM 342:2014 (34) após a realização do ensaio de impacto para a verificação de aparição de defeitos superficiais nos corpos de prova. O ensaio foi realizado na sede da empresa A em equipamento da marca Gauss Teste de duas bobinas de modo a verificar simultaneamente descontinuidades no sentido longitudinal e transversal ao eixo do pino, com corrente simultânea de 100 ampéres, conforme Figura 24.



Figura 24 - Corpo de prova da amostra CP3E em equipamento de ensaio por partículas magnéticas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise da microestrutura

A análise metalográfica realizada nas amostras de matéria-prima sem qualquer tratamento de endurecimento revelou uma microestrutura formada por perlita e ferrita típica de um aço DIN 41Cr4, conforme pode ser observado nas Figura 25 e Figura 27. Segundo o certificados de matéria-prima do fornecedor, o tamanho de grão austenítico de todas as amostras foi de 7. Como pode ser visto, a matéria-prima possui microestrutura majoritariamente perlítica e um grão ferrítico bastante fino (>8), o que irá aumentar o ganho de resistência mecânica quando trabalhado a frio pela alta quantidade de contornos de grão atuando efetivamente como barreiras para o deslocamento de discordâncias durante o trabalho a frio (22). Além disto, a temperatura elevada do tratamento térmico de alívio de tensões realizado na matéria-prima após o corte fez com que a perlita começasse a perder seu aspecto lamelar devido à esferoidização da cementita (21).



Figura 25 - Análise metalográfica em seção transversal de amostra da matéria-prima utilizada para confeccionar as amostras CP1E e CP1T. Aumento original de 100X.

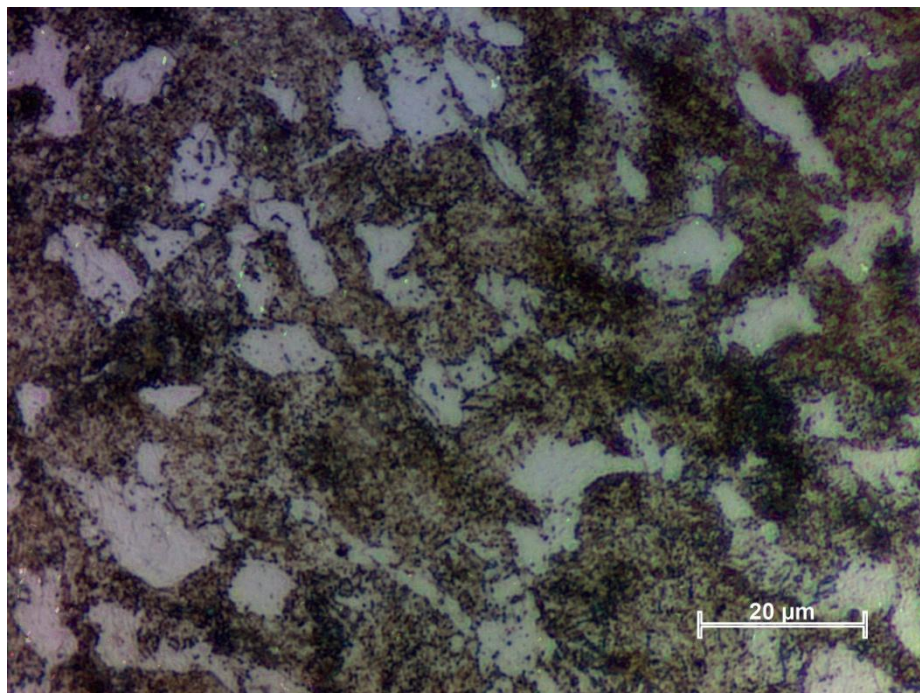


Figura 26 - Análise metalográfica em seção transversal de amostra da matéria-prima utilizada para confeccionar as amostras CP1E e CP1T. Aumento original de 1000X.

Nas amostras endurecidas por encruamento, como pode ser visto nas Figura 27 e Figura 28, em regiões próximas ao centro da esfera, onde ocorre a maior deformação durante a conformação do componente, os grãos estão altamente deformados propiciando um ganho na resistência mecânica. Na região do cone do pino, local onde ocorre a menor deformação durante o trabalho a frio, os grãos apresentam formato próximo ao original e, conseqüentemente, um ganho menor de resistência mecânica, conforme mostrado na Figura 29.

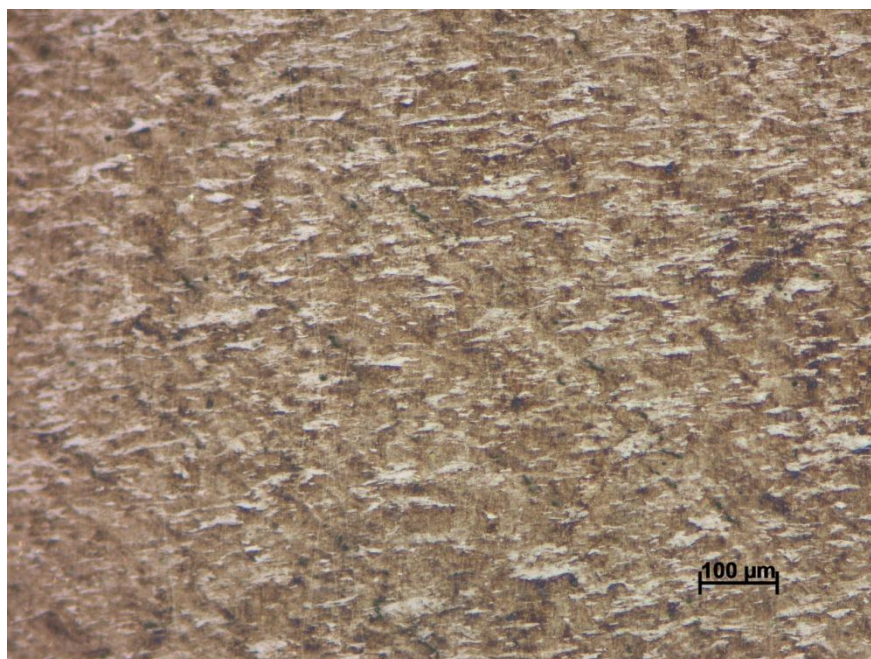


Figura 27 - Análise metalográfica realizada próxima ao centro da esfera de um dos corpos de prova da amostra CP1E, com grãos deformados devido ao trabalho a frio. Aumento original de 100x.

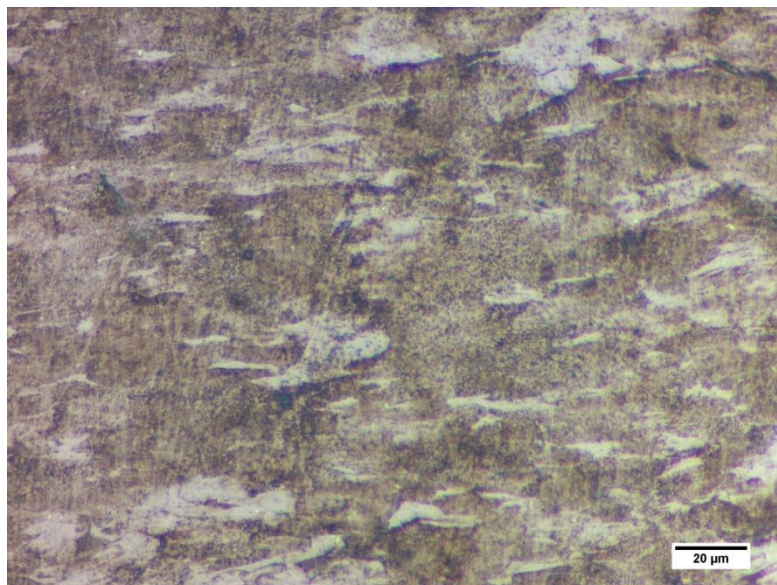


Figura 28 - Análise metalográfica realizada próxima ao centro da esfera de um dos corpos de prova da amostra CP1E, com grãos deformados devido ao trabalho a frio. Aumento original de 500x.

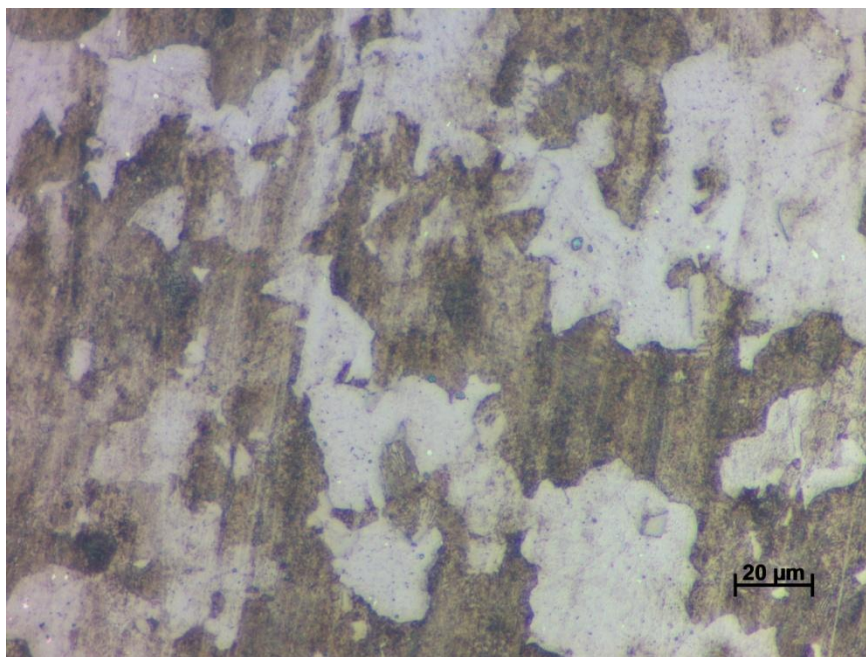


Figura 29- Análise metalográfica realizada próxima ao centro do cone de um dos corpos de prova da amostra CP1E, com grãos pouco deformados devido ao trabalho a frio. Aumento original de 500x.

A análise metalográfica de peças endurecidas por têmpera e revenimento revelou microestrutura formada por martensita revenida com aspecto semelhante à placas e ripas. A alta temperatura de revenimento utilizada para se obter a dureza dentro dos limites estipulados pela norma ABNT 16130 e garantir tenacidade ao componente fez com que parte da cementita adquirisse forma levemente esferoidizada (27). Essa microestrutura, que pode ser observada na Figura 30, diminuindo eficientemente a fragilidade do material.

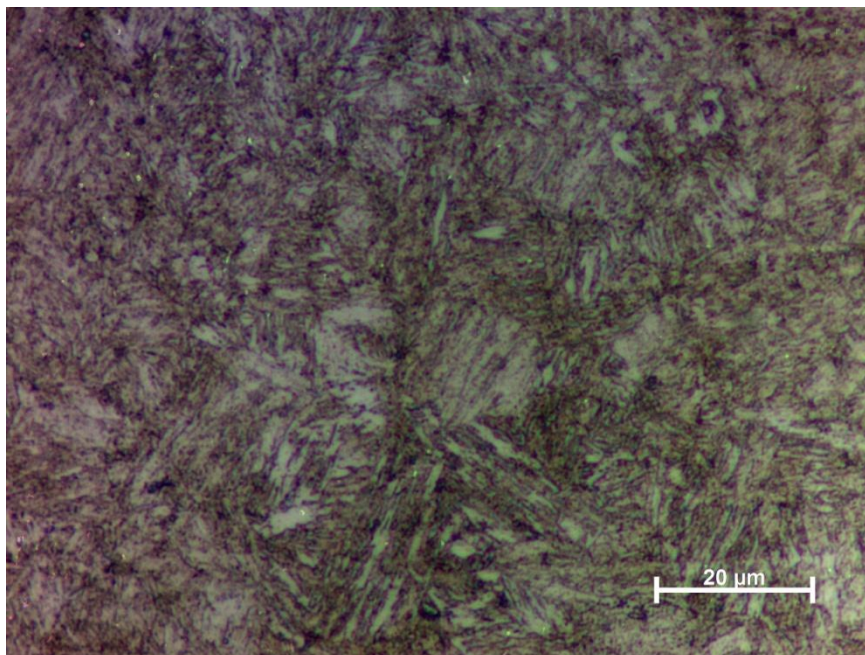


Figura 30 - Análise metalográfica realizada próxima ao centro da esfera de um dos corpos de prova da amostra CP2T. Aumento original de 1000X.

5.2 Ensaio de dureza

A compilação dos resultados dos ensaios de dureza realizado em todos os corpos de prova pode ser observado na Tabela 5. Como pode ser observado, todas as amostras apresentaram limite de resistência à tração acima do mínimo especificado na ABNT NBR 16130 e abaixo de seu limite máximo (820 até 1250 MPa), com as amostras endurecidas por têmpera e revenimento com valores de dureza medidos maiores do que as amostras encruadas. Isso mostra que, neste caso, o endurecimento por têmpera e revenimento foi mais eficiente para se obter maiores valores de dureza se comparado com o encruamento.

Também pode ser observado que o desvio padrão das medidas de dureza nas amostras endurecidas por encruamento foi, em geral, maior do que aquele calculado para amostras temperadas. Isso possivelmente ocorre pois estas amostras possuem regiões que deformam mais que outras durante o trabalho a frio, gerando partes mais encruadas que outras dentro da mesma peça. Na Figura 31, por exemplo, pode ser observado a impressão do ensaio de dureza Vickers na região da esfera e do cone em um dos corpos de prova da amostra CP1E, com distância entre os vértices claramente diferentes entre elas. Já em corpos de prova endurecidos por têmpera e revenimento duas impressões nestas mesmas regiões apresentam pequena variação de tamanho, como pode ser visto na Figura 32.

Tabela 5 - Resultado dos Ensaios de Dureza

Amostra	Dureza da matéria prima	Dureza média (HV)	Desvio padrão	Dureza convertida para limite de resistência à tração (MPa)
CP1E	99,5 HRB	294,67	19,59	950
CP1T	99,7 HRB	317,79	15,26	1002
CP2E	20,1 HRC	299,17	6,31	965
CP2T	20,1 HRC	323,46	9,55	1004
CP3E	20,4 HRC	288,17	17,38	930
CP3T	20,3 HRC	334,35	13,042	1050
CP4E	21,2 HRC	296,46	23,21	964
CP4T	21,4 HRC	347,43	12,61	1097

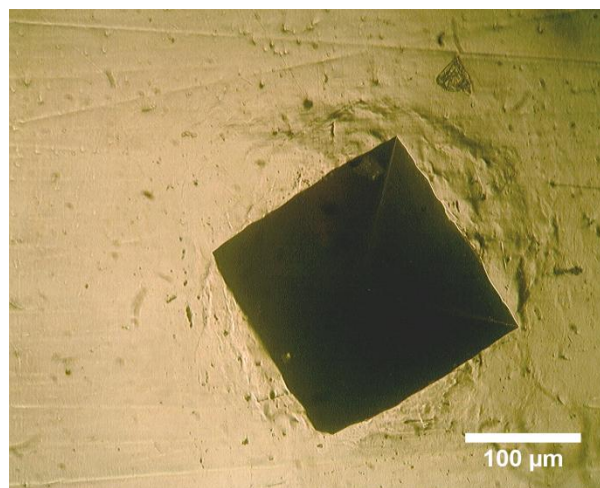
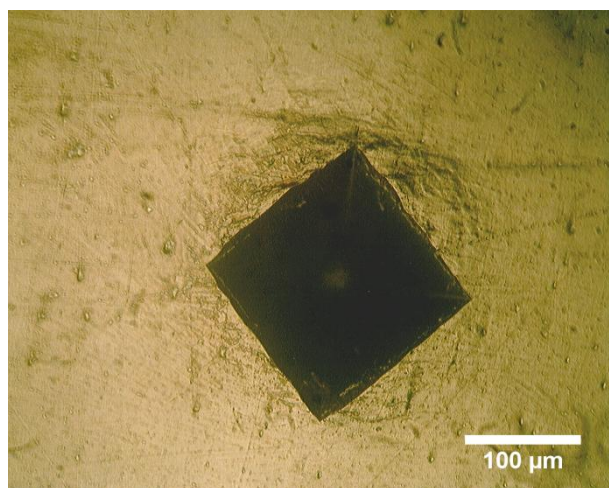


Figura 31 - Impressões geradas durante o ensaio de dureza de um dos corpos de prova da amostra CP1E na região da esfera (esquerda) e cone (direita) do corpo de prova.

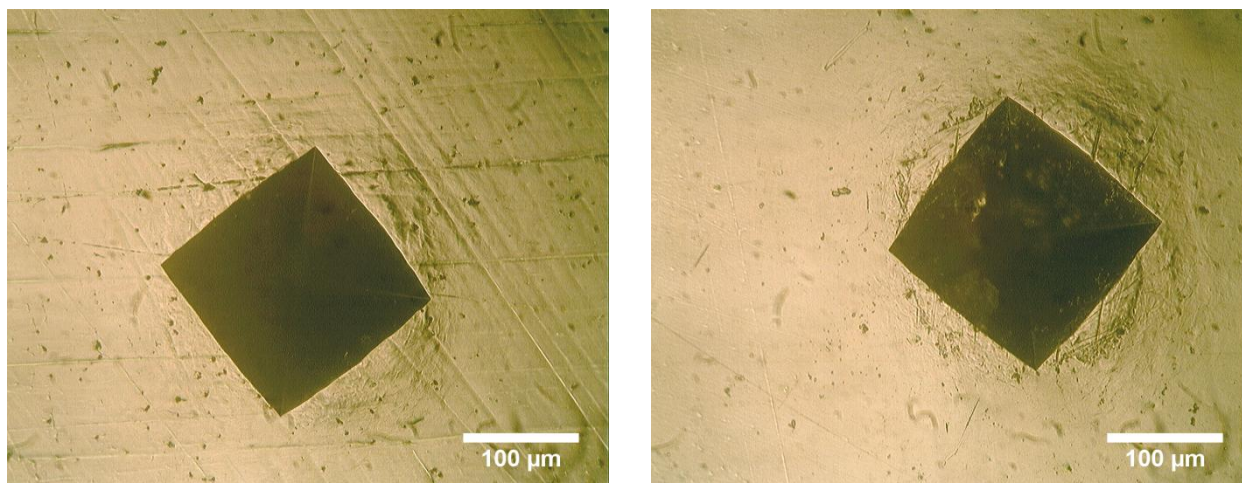


Figura 32 - Impressões geradas durante o ensaio de dureza de um dos corpos de prova da amostra CP3T na região da esfera (esquerda) e cone (direita) do corpo de prova.

Como pode ser visto também na Tabela 5, os valores medidos de dureza nas amostras das matérias-primas foram bastante semelhantes entre si, fluando em torno de 20 HRC. Estes valores convertidos para dureza Vickers se equivalem a, aproximadamente, 240 HV. Este aumento acentuado de dureza pode ser explicado devido à microestrutura majoritariamente perlítica da matéria-prima, que diminui o caminho livre de movimentação de discordâncias e aumenta eficientemente a dureza do material durante o trabalho a frio (22).

5.3 Ensaio de impacto

Todos os corpos de prova resistiram ao ensaio de impacto sem apresentar falha. Após o impacto, todos os corpos de prova apresentaram deformação com angulação menor que 20°. O ângulo de deflexão médio de cada amostra pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 - Ângulo médio de deflexão gerado pelo impacto

Amostra	Ângulo médio de deflexão
CP1E	11,8°
CP1T	11,1°
CP2E	8,9°
CP2T	4,8°
CP3E	10°
CP3T	7,7°
CP4E	6,5°
CP4T	2,2°

Como pode ser observado na Tabela 6, os corpos de prova endurecidos por encruamento apresentaram, em geral, maior deformação causada pelo impacto se comparados com corpos de prova de mesmo desenho e endurecidos por têmpera e revenimento. Isso ocorre, provavelmente, devido a diferenças de resistência mecânica causadas pelo processo de endurecimento e diferenças microestruturais entre eles, que fez com que corpos de prova temperados apresentassem um comportamento mais elástico do que plástico se comparados à corpos de prova encruados. Na Figura 33 pode se observar os corpos de prova que apresentaram, respectivamente, a maior e menor deformação entre os ensaiados.

O reduzido tamanho de grão dos corpos de prova e sua resistência mecânica garantem que o material apresente alta resistência mecânica e tenacidade, propiciando a capacidade de absorver impactos que poderiam em outras condições gerar falhas catastróficas. Na prática, no caso do motorista colidir o veículo, esta capacidade de absorver impactos de alta energia sem romper poderá ser o que fará a diferença entre perder ou não o controle total das rodas do veículo, uma vez que, em caso de rompimento do pino esférico, a ligação entre a direção e a roda deixará de existir.



Figura 33 - Corpos de prova das amostras CP1E (esquerda) e CP4T(direita), de maior e menor deformação após o ensaio de impacto, respectivamente.

5.4 Ensaio por Partículas Magnéticas

O ensaio por partículas magnéticas realizado após os ensaios de impacto confirmou o que foi analisado visualmente. Nenhum dos corpos de prova analisado apresentou descontinuidades superficiais geradas pelo impacto. O resultado da inspeção por partículas magnéticas realizado após o ensaio de impacto de um dos corpos de prova da amostra CP3E pode ser observado na Figura 34.



Figura 34 - Resultado do ensaio por partículas magnéticas em corpo de prova da amostra CP3E após o ensaio de impacto, sem apresentar descontinuidades superficiais.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se inferir as seguintes conclusões:

- Quantos às propriedades microestruturais dos corpos de prova analisados:

As altas temperaturas de revenimento de corpos de prova temperados evitaram que os mesmos apresentassem comportamento frágil nas condições testadas. Já em corpos de prova endurecidos por encruamento, o tamanho de grão fino da matéria-prima utilizada garantiu que os mesmos atingissem os valores de limite de resistência à tração exigidos pela norma ABNT NBR 16130 e pela Portaria 247 de 2013 do INMETRO. Em suma, ambas as microestruturas se mostraram eficientes para que os corpos de prova confeccionados obtivessem resistência à tração e tenacidade exigidas para estes componentes.

- Quantos às propriedades mecânicas dos corpos de prova analisados:

Todos os corpos de prova analisados apresentaram propriedades mecânicas (resistência mecânica obtida por conversão de dureza e resistência ao impacto) dentro das estabelecidas na norma ABNT NBR 16130. O processo de endurecimento por têmpera e revenimento mostrou ser mais eficiente para garantir componentes com maior resistência mecânica e menor variabilidade em relação a sua dureza. Os corpos de prova endurecidos por encruamento, porém, apresentaram propriedades mecânicas satisfatórias de acordo com aquelas exigidas pela legislação brasileira atual.

Em suma, ambos os processos de endurecimento poderiam ser aplicados para que se obtivesse as propriedades exigidas pela legislação atual para pinos esféricos de terminais de direção. O processo de endurecimento por encruamento, que já ocorre durante a conformação a frio destes componentes, poderia ser uma alternativa viável técnica e econômica para o processo de endurecimento por têmpera e revenimento.

7 TRABALHOS FUTUROS

Após a realização destes trabalhos, é possível fazer as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

I – Avaliar a vida em fadiga de corpos de prova endurecidos por encruamento e endurecidos por tratamento térmico;

II – Avaliar a utilização de diferentes matérias-primas para a confecção de pinos esféricos de terminais de direção endurecidos por encruamento e por têmpera e revenimento;

III – Avaliar a resistência ao desgaste de pinos esféricos de terminais de direção endurecidos por encruamento e por têmpera e revenimento.

8 REFERÊNCIAS

1. *Micro-alloyed steels for non heat treated ball studs and*. **Urlau, Ulrich, Hasler, Stephan and Kruse, Jochen**. Wiesbaden : s.n., 2005. International Conference on Steels in Cars and Trucks. p. 374/83.
2. **Heißing, Bernd and Ersoy, Metin**. *Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components*,. [ed.] Ewald Schmitt and Elisabeth Lange. 1st. Berlin : Deutsche Nationalbibliothek, 2011. p. Chassis Handbook. Vol. 1, Baseado na segunda edição do livro alemão Fahrwerkhandbuch editado por Bernd Heißing e Metin Ersoy. ISBN 978-3-8348-0994-0.
3. **Harrer, Manfred e Pfeffer, Peter**. *Steering Handbook*. s.l. : Springer, 2017. ISBN 978-3-319-05449-0.
4. **Thombare, Madhuri e Talmale, P. S**. *Evaluation of the Performance of Tie Rod and Optimization using FEA: A Review*. New Delhi : IJIR, 2017. Vol. 3. ISSN: 2454-1362.
5. **Knowles, Don**. *Classroom Manual for Automotive Suspension & Steering Systems*. [ed.] David Boelio e Larry Main. Quinta Edição. Clifton Park : Delmar, 2011. ISBN-13: 978-1-4354-8115-2.
6. **Arrnaldo Vieira, Cabral**. *MEDIÇÃO DE FORÇA EM BARRA AXIAL DO SISTEMA DE DIREÇÃO AUTOMOTIVO*. Canoas : s.n., 2015. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Autoomotiva pela ULBRA Canoas. Orientador Prof. Dr. Luiz Carlos Gertz.
7. **Kruse, J., et al**. *Shortening the Process Chain in the Ball Pin Production / Chassis Components by Using Stainless Steel*. Fellbach, Germany : s.n., 2013.
8. **INMETRO**. Portaria n.º 247/13. 03 de Maio de 2013.
9. **Lee, G. A., et al**. *Forming Technology for Cold Forging Processes of Ball Stud using Non-Heat-Treated Cold Forging Materials*. Switzerland : Trans Tech Publications, 2005. pp. 3247-3250. Vols. 475-479. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.475-479.3247.
10. **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)**. Veículos rodoviários automotores — Terminais de direção, barras de direção, barras de ligação e conjuntos de barras axiais — Requisitos e métodos de ensaio aplicados a veículos categorias M e N e categorias G e O (quando aplicável). 22 de Dezembro de 2012.
11. **Acovisa Industria E Comercio De Aços Especiais Ltda**. Aços Ligados Para Beneficiamento. *Site da Açovisa*. [Online] Açovisa Indústria e Comércio de Aços Especiais, 2014. [Citado em: 10 de Outubro de 2018.] <http://www.acovisa.com.br/aco/acos-ligados-p-beneficiamento/>.
12. **Mustafa, Bayrak, et al**. *Analysis of Tempering Treatment on Material Properties of DIN 41Cr4 and DIN 42CrMo4 Steels*. s.l. : ASM International, 2007. pp. 597-600. Vol. 16(5). DOI: 10.1007/s11665-007-9043-1.
13. **ASM International Handbook Committee**. *ASM Handbook, Volume 14A, Metalworking: Bulk Forming*. [ed.] S.L. Semiatin. Materials Park : ASM International, 2005. Vol. 14A. ISBN: 0-87170-708-X.
14. **Gerdau Aços Finos Piratini**. Manual dos Aço. [Catálogo]. Charqueadas : s.n., 2003. Edição atualizada 2003.
15. **Lucefin Group**. Technical Card for 41Cr4 Steel. [Dasheet]. Esine, Itália : s.n.

16. **Becker, Renata Helena Santer e Reguly, Afonso.** *Estudo da influência da taxa de resfriamento e temperatura nos últimos passes de laminação de fio máquina sobre a resposta ao tratamento térmico de esferoidização em um aço DIN 41Cr4.* Porto Alegre : s.n., 2012.
17. **Lucefin Group.** Technical Card for 42CrMo4 Steel. Esine, Itália : Lucefin Group.
18. **Kawulok, Petr, et al.** *DEFORMATION BEHAVIOUR OF LOW-ALLOY STEEL 42CrMo4 IN HOT STATE* . Brno : s.n., 2011.
19. **ASM International.** *ASM Metals Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys.* s.l. : ASM International, 1993. ISBN: 978-0-87170-377-4.
20. **ISO.** *ISO 18265:2003 - Metallic Materials - Conversion of hardness values (English version of DIN EN Iso 18265).* s.l. : CEN, 2003.
21. **Callister, Jr., Willian D. e Rethwisch, David G.** *Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução.* [trad.] Sergio Murilo Stamile Soares. Rio de Janeiro : LTC, 2012. ISBN: 978-0-470-41997-7.
22. **Dieter, George E.** *Melaurgia mecânica.* Segunda edição. Rio de Janeiro : Guanabara 2, 1981.
23. **ASM International.** *ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation.* s.l. : ASM International, 2000. ISBN 978-0-87170-389-7.
24. **ASTM.** *ASTM A370 - Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.* West Conshohocken : ASTM International, 2017. DOI: 10.1520/A0370-17A.
25. **Black, J. T. and Kohser, Ronald A.** *DeGarmo's Materials and Porcesses in Manufacturing.* [ed.] Joseph Hayton. 10ª. s.l. : John Wiley & Sons, 2008. ISBN13-978-0470-05512-0.
26. **ASM International.** *ASM Handbook - Volume 4: Heat Treating.* s.l. : ASM International, 1991. ISBN 13: 9780871703798.
27. **Krauss, George.** *STEELS Processing, Structure, and Performance.* s.l. : ASM International, 2005. ISBN: 0-87170-817-5.
28. **ASM International.** *ASM Handbook Volume 9 - Metallography and Microstructures.* s.l. : ASM International, 2004. Vol. 9. ISBN 978-0-87170-706-2.
29. **ASTM International.** *ASTM E407(2015)e1. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.* West Conshohocken, PA : ASTM International, 2015. 1. DOI: 10.1520/E0407-07R15E01.
30. **ASM International.** *ASM Handbook Volume 17: Nondestructive evaluation and quality control.* s.l. : ASM International, 1997. ISBN 0-87170-007-7.
31. **Associação Brasileira de Normas Técnicas.** ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008 . *Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).* s.l. : ABNT, 2008.
32. **ASTM International.** *ASTM E3 - 11(2017). Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.* Conshohocken : ASTMm International, 2017. 11. DOI: 10.1520/E0003-11R17.
33. **Associação Barsileira de Normas Técnicas.** ABNT NBR 15454:2007. *Metalografia das ligas de ferro-carbono - Terminologia.* s.l. : ABNT, 2007.

34. **Associação Brasileira de Normas Técnicas.** ABNT NBR NM 342:2014. *Ensaaios não destrutivos - Partículas magnéticas - Detecção de descontinuidades.* s.l. : ABNT, 2015.

35. —. ABNT NBR 11568:2016 . *Materiais metálicos - Determinação do tamanho de grão.* s.l. : ABNT, 2016.

36. **ASTM International.** ASTM E140 - 12be1. *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness.* West Conshohocken, PA : ASTM International, 2012. DOI: 10.1520/E0140-12BE01.

37. **Totten, George E.** *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies.* Segunda Edição. Boca Raton : CRC Press, 2007. ISBN-10: 0-8493-8455-9.